CHARGED
VIRTUAL CONFERENCE
EV ENGINEERING

電気自動車の電力密度を向上させる革新的な冷却コンセプト





イスマイル レジェピ (Ismail Recepi)
Silicon Austria Labs (SAL)
シニア リサーチ エンジニア
ユニット パッケージング＆マルチ フィジックス

ラファエル ガルシア (Rafael Garcia)
インフィニオン テクノロジーズ
OBCおよびDC-DCアプリケーション向け
システム アーキテクト



アジェンダ

01 Tiny Power Box Project

02 Evolution from System Integration to Simulation

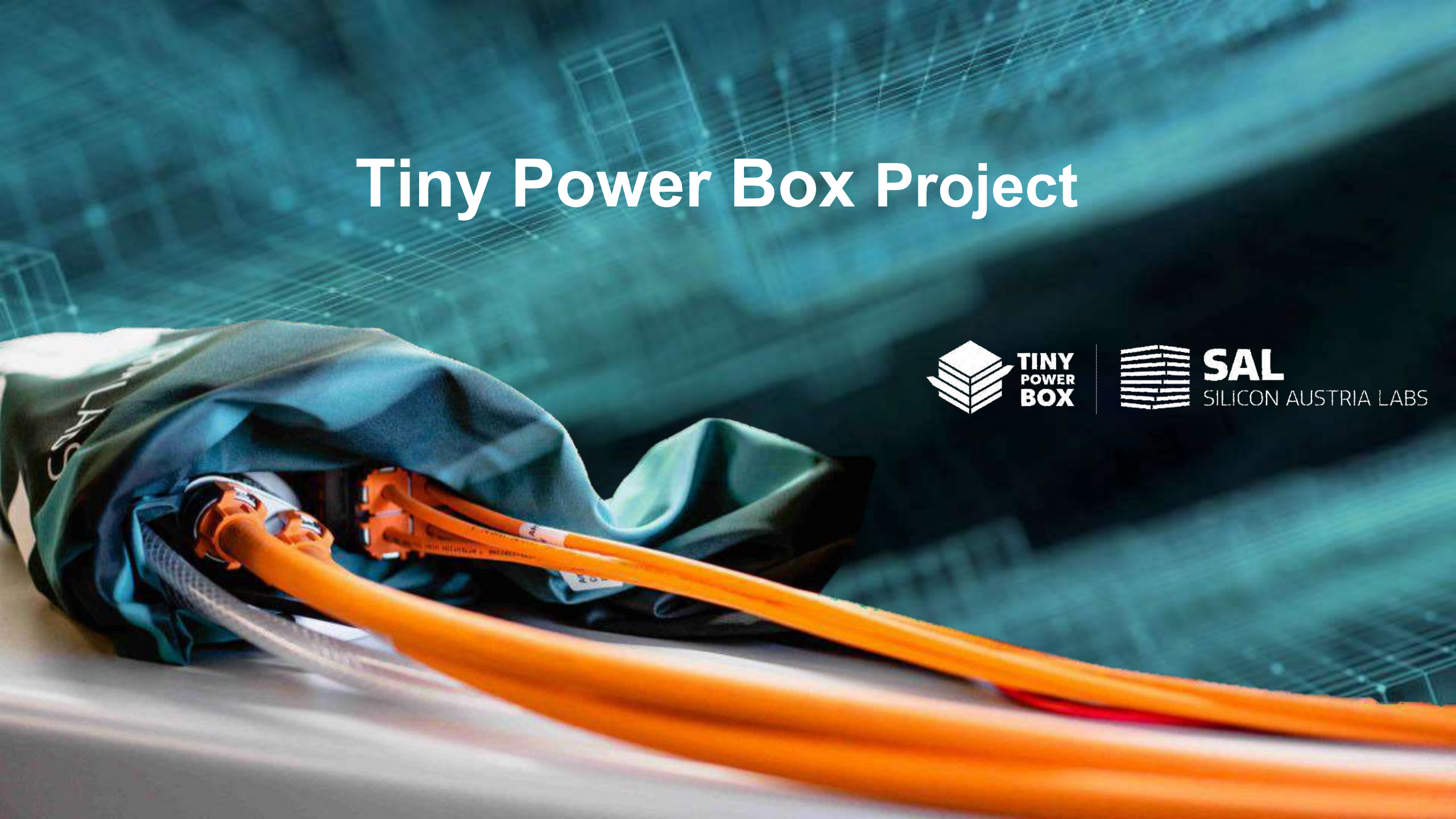
03 Enhancing System Integrity

04 Topology and Isolation

05 Optimal Component Layout

06 Thermo/Mechanical Simulations

Tiny Power Box Project

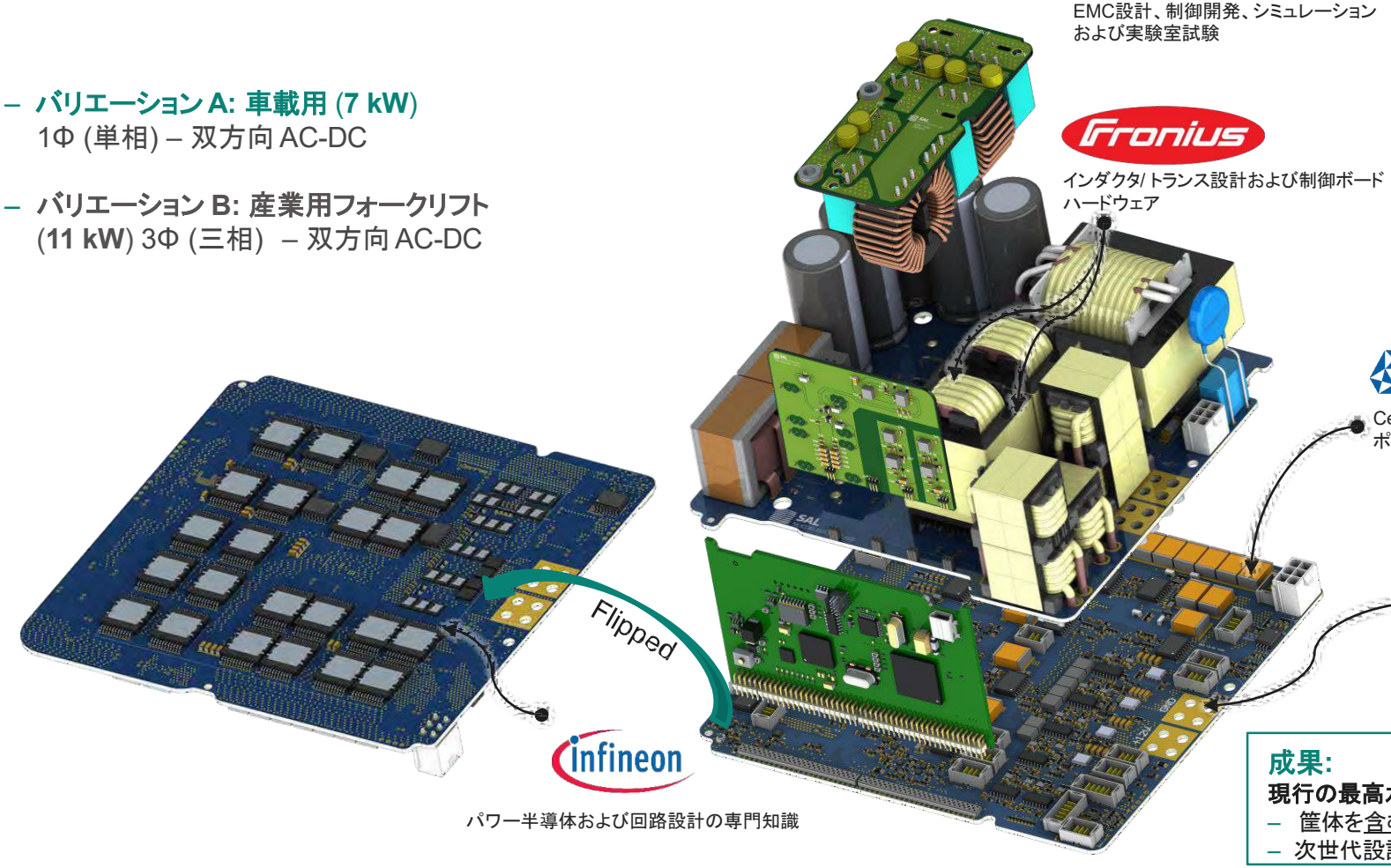


共同プロジェクトの理想モデル

最先端の電力密度と包括的なシミュレーションワークフローを実現する
HV-LV電圧コンバーター を搭載した双方向車載オンボードチャージャー

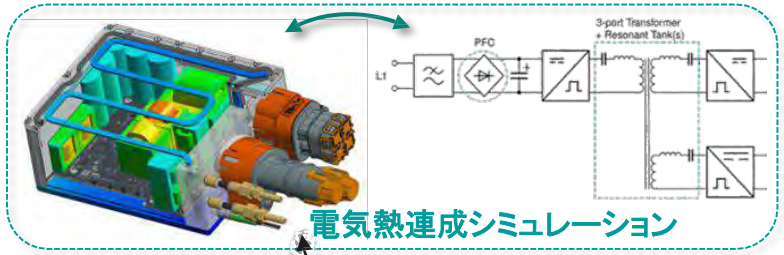
– **バリエーション A: 車載用 (7 kW)**
1Φ (単相) – 双方向 AC-DC

– **バリエーション B: 産業用フォークリフト**
(**11 kW**) 3Φ (三相) – 双方向 AC-DC



SAL SILICON AUSTRIA LABS
トポロジー最適化、システム設計、
EMC設計、制御開発、シミュレーション
および実験室試験

Fronius
インダクタ/ トランス設計および制御ボード
ハードウェア



+ 開発パス:
システム寿命

TDK
Ceralink™モデリング、コンデンサ専門技術、
ポッティング組み立て

AVL
熱管理、システム、信頼性
シミュレーションの専門知識.

AT&S
組み込みMOSFETのベンチ
マークおよびシミュレーション

博士課程および修士課程の学生
TU Graz
KÄRNTEN University of Applied Sciences

Infineon
パワー半導体および回路設計の専門知識

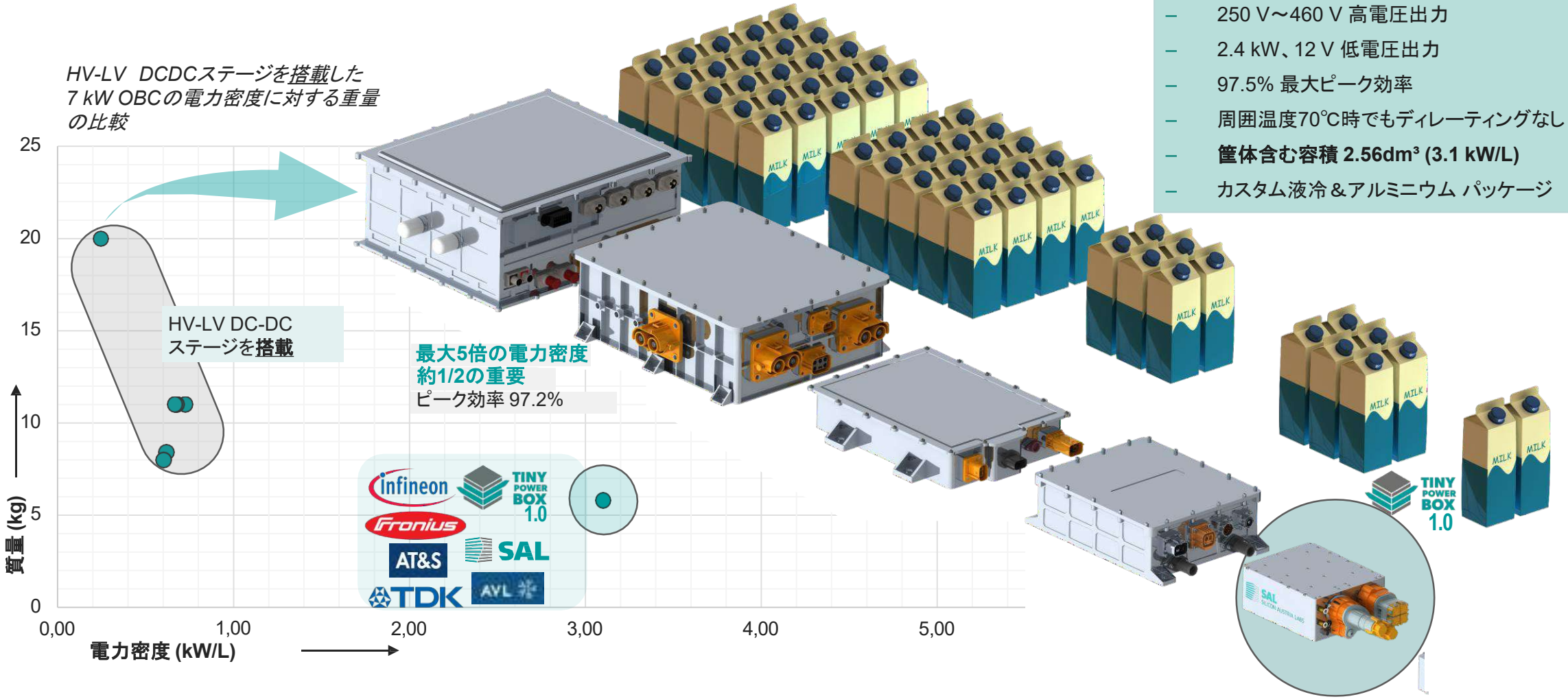
成果:
現行の最高水準をも凌ぐOBC電力密度
– 筐体を含む実総容積2.56 L
– 次世代設計による最適化で、目標体積 2 L未満

Copyright © Infineon Technologies AG 2024. All rights reserved.

Tiny Power Box 1.0と市場製品の比較
最初のコンセプト設計で実現されたこと

- 1Φ (単相) - 7.0 kW 双方向 AC-DC
- 250 V～460 V 高電圧出力
- 2.4 kW、12 V 低電圧出力
- 97.5% 最大ピーク効率
- 周囲温度70°C時でもディレーティングなし
- **筐体含む容積 2.56dm³ (3.1 kW/L)**
- カスタム液冷＆アルミニウム パッケージ

HV-LV DCDCステージを搭載した 7 kW OBCの電力密度に対する重量の比較



Copyright © Infineon Technologies AG 2024. All rights reserved.

Tiny Power Box 2と市場製品の比較
電力密度の次の段階とさらなるイノベーション

- 1Φ (単相) および 3Φ (三相) 動作
- **電力密度最大2倍**
- 低電圧部で**最大2倍**の電力供給
- **12 V**の補助ポート
- **アクティブ**EMIフィルター
- **アクティブDCバス安定化**



電力密度 5 kW/L超

車載アプリケーション用双方向OBCコンセプト
11kW (3.5kW)/ 3 (単) 相;
5kW/L超の電力密度;
最適化された水冷システム;
3相/単相動作

TINY POWER BOX 2.0

SAL, Infineon, Fronius, META SYSTEM, TDK, AVL, TU Graz

Copyright © Infineon Technologies AG 2024. All rights reserved.

システム インテグレーションから
シミュレーションへの進化

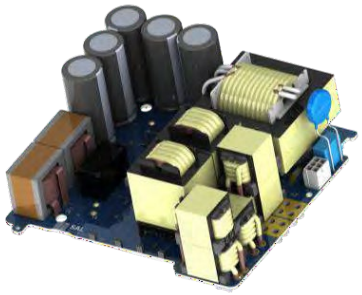


TINY POWER BOX

SAL
SILICON AUSTRIA LABS

システム インテグレーションからシミュレーションへの進化

次世代電動車両: 革新的な冷却およびコンバーター アプローチで電力密度を最大化



- 1:1 3Dコンポーネント モデリング
- システム レイアウト
- 冷却コンセプト
- 最先端コンポーネントの実装
- コンポーネントの配置と構成の最適化
- 要件レビューならびに実現可能性調査

システム インテグレーション

MCAD

- 面積に対する要件を概念化
- コンポーネント配置
- レイアウト設計
- 基板外形定義
- 交差検出

機械系 (3D CAD) と電気系 (2D Layout) を統合

ECAD

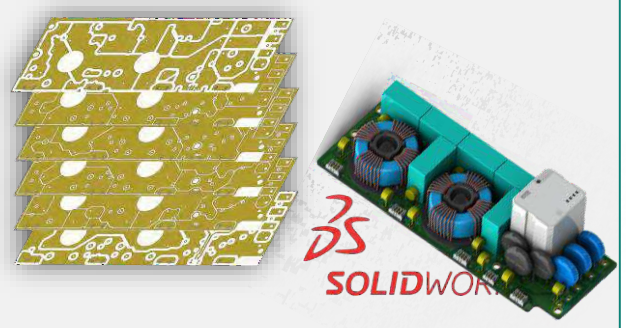
- 基板形状の定義
- 衝突検出
- 2Dレイアウト設計

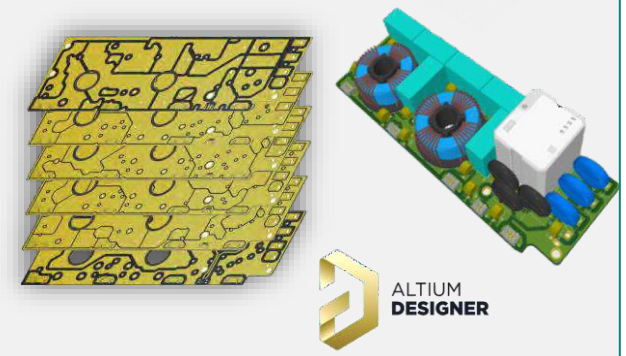
- 機械環境評価
- PCB組立プロセス
- 軸芯出し
- パッケージからの部品距離

システムレベル マルチボード設計: 設計ルールチェックと組立

- PCB 層スタックおよび厚みの仕様
- 3D形状とレイアウトのインポート
- フットプリント定義
- 配線および回路図設計

- メカエレクトロニクス用高忠実度幾何学の詳細
- メカトロニクスおよび電子部品ライブラリ管理
- 製造データの生成
  - 部品表 (BOM)
- 製造能力の評価
- 図面および回路図の作成



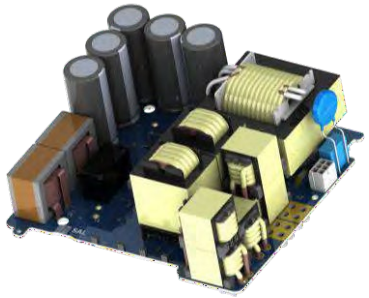


https://www.altium.com/solutions/by-technology/ecad-mcad

Copyright © Infineon Technologies AG 2024. All rights reserved.

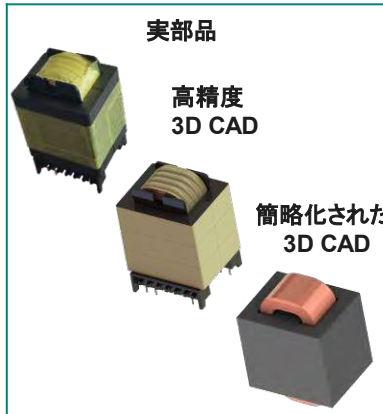
システム インテグレーションからシミュレーションへの進化

次世代電動車両：革新的な冷却およびコンバーター アプローチで電力密度を最大化



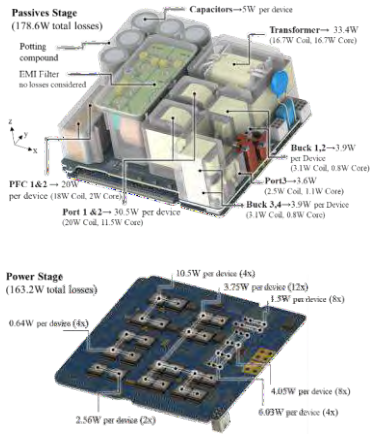
- 1:1 3Dコンポーネント モデリング
- システム レイアウト
- 冷却コンセプト
- 最先端コンポーネントの実装
- コンポーネントの配置と構成の最適化
- 要件レビューならびに実現可能性調査

システム統合



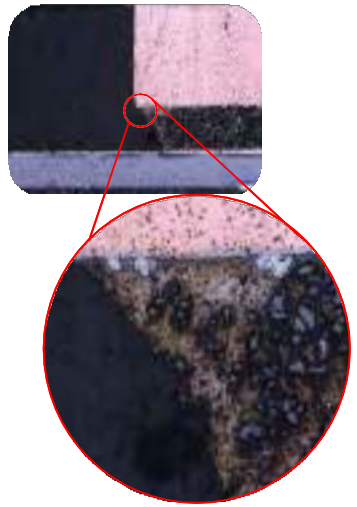
- 3D CADモデルの簡略化
- 非必須部品のデフィーチャリング
- 部品形状の簡略化

シミュレーション準備



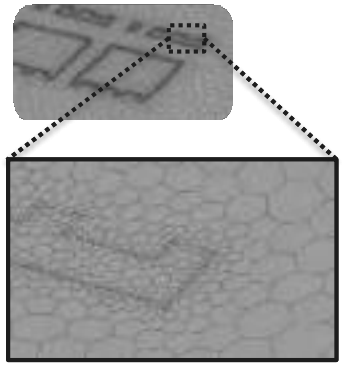
- 負荷と熱入力の適用
- **電力段**: 半導体ダイに起因する損失
- **パッシブ ステージ**: フェライトコアと巻線への損失割り当て

シミュレーションシナリオと事例研究



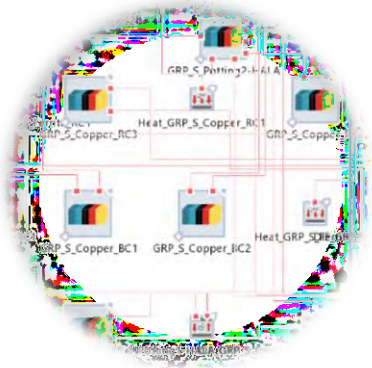
- 材料特性の割り当て
- 境界条件定義
- 初期条件設定

材料特性の割り当て



- 形状とメッシュの検証
- 収束基準
- シミュレーションパラメータの選択

離散化とメッシュ生成



- 熱シミュレーションを簡略化するための低次元モデル (ROM) の開発
- 熱シミュレーション結果を解析するための後処理手順

3Dおよび1Dシミュレーション (低次元モデル)

Copyright © Infineon Technologies AG 2024. All rights reserved.

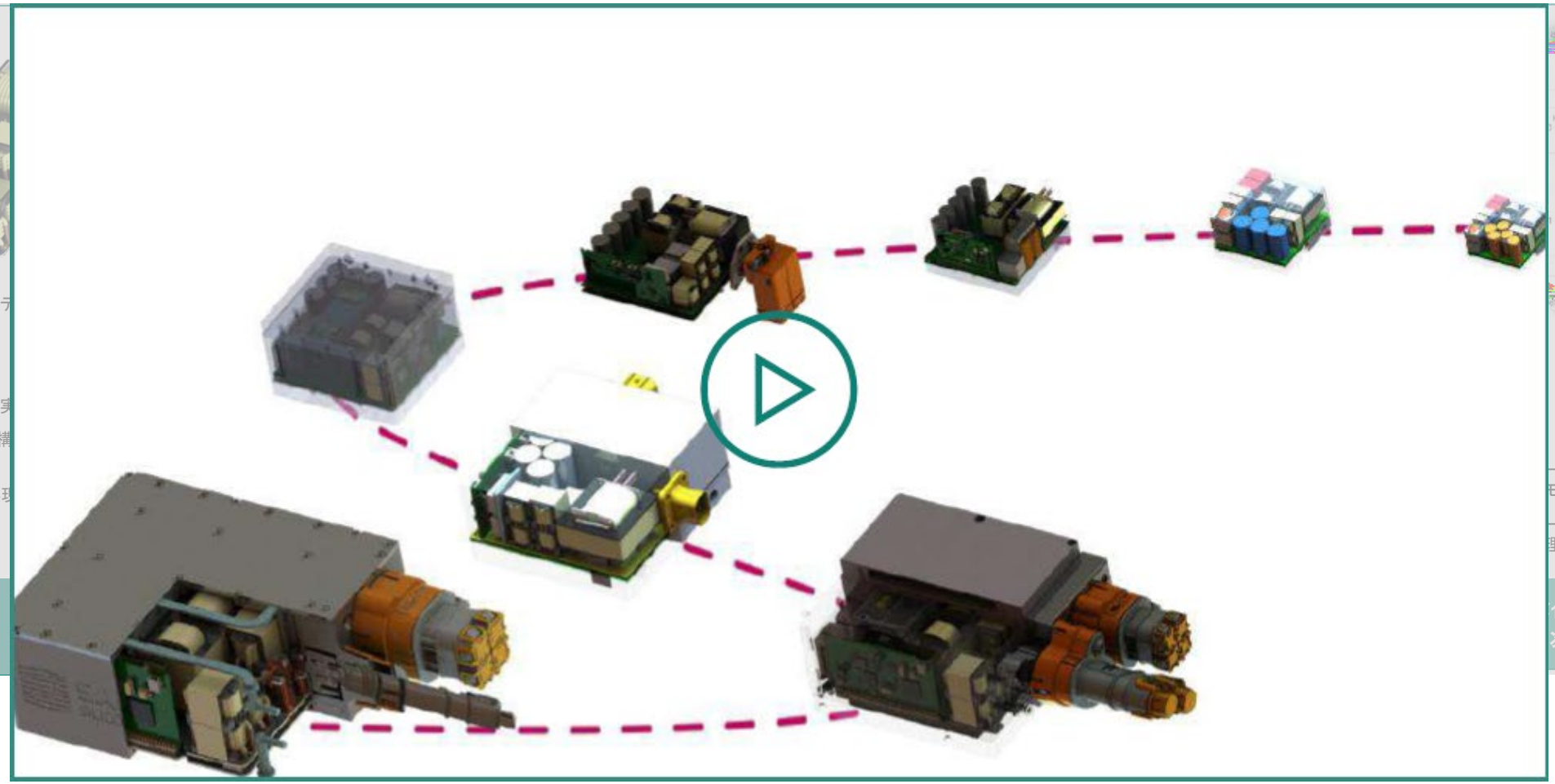
システム インテグレーションからシミュレーションへの進化

次世代電動車両: ゼロからヒーローへ



- 1:1 3Dコンポーネント モデ
- システム レイアウト
- 冷却コンセプト
- 最先端コンポーネントの実
- コンポーネントの配置と構造 適化
- 要件レビューならびに実現 性調査

システム統合





ーションを簡略化するため モデル (ROM) の開発

ーション結果を解析するた 理手順

1Dシミュレーション 次元モデル)

Copyright © Infineon Technologies AG 2024. All rights reserved.

システム インテグレーションからシミュレーションへの進化

次世代電動車両: 革新的な冷却およびコンバーター アプローチで電力密度を最大化

- **電気熱連成シミュレーションの要件::**
  - 部品の精密な幾何学的モデルと正確な材料データ
  - 包括的な熱特性評価による電気的に正確な部品モデル (能動/受動部品共)

- **電気熱連成シミュレーションを適用すべきタイミング:**
  - **高密度設計:** 基板やPCB上の部品密度が高くなると、部品間の熱的相互作用が顕著
  - **熱的相互作用:** 受動部品と半導体間で観測されうる熱的相互作用が発生
  - **パッケージ起因の結合:** 筐体やパッケージ部品は、電子組み立ての異なるセクションを熱的に結合させることが多く、さまざまなステージ間で熱流束による干渉が発生

Copyright © Infineon Technologies AG 2024. All rights reserved.


システム インテグリティの強化
TINY POWER BOX
SAL
SILICON AUSTRIA LABS

システム インテグリティの強化
異なるアセンブリ コンセプトでさらに効率的な冷却を実現

OBCの新アプローチの提案構成は、**上面放熱**および**両面放熱**の電力部品を活用することで、**効率的な冷却**、**TIM加圧時**の**優れた機械的完全性**、そして最終的に、**きわめて高い電力密度**および**電気効率**を実現

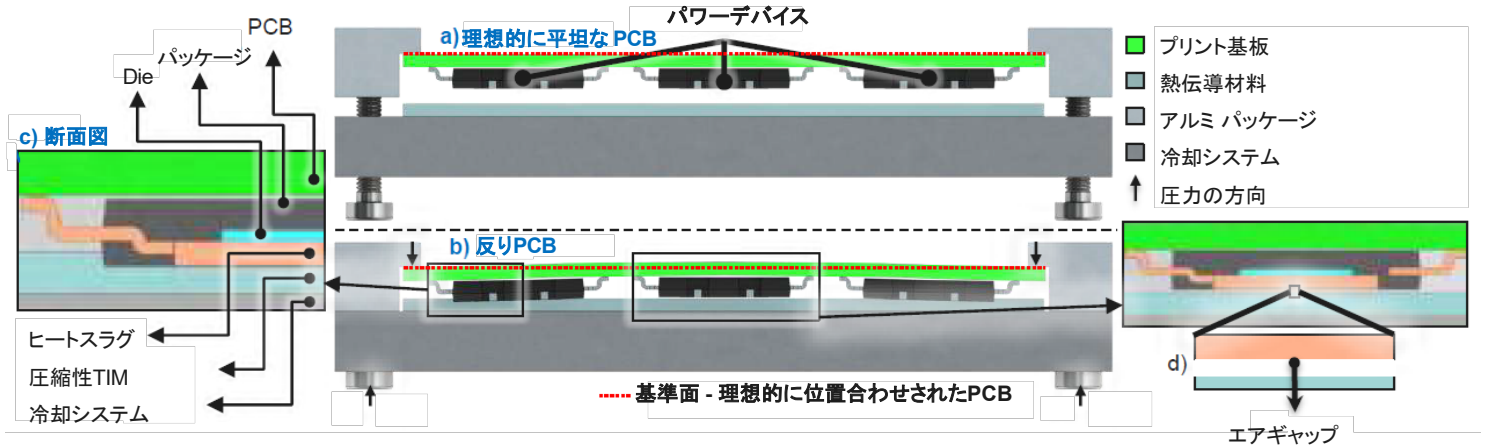


図1:

a) 理想的に平坦なPCB: 圧力が加わっていない状態
b) PCB の反り: 圧力が不均一な場合、PCB が反り、TIM が部分的に過度に加圧されることがあります
c) 最悪の場合、一部のパワー デバイスでは熱伝導が弱くなるか、ゼロになります (d).

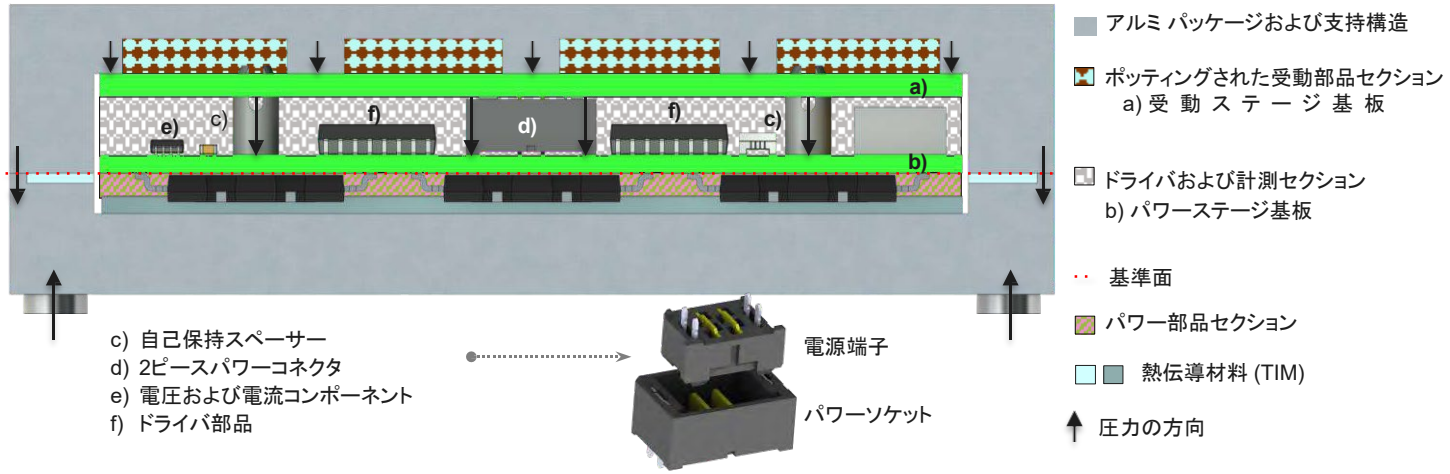


図 2:

アルミ パッケージおよび支持構造からの圧力は、パワーステージ基板に向けられ、反りを最小限に抑え、半導体部品の効果的な熱的接合とTIMの均一な加圧を確実なものにします。

I. Recepi, C. Mentin, P. Matzic and R. A. Garcia Mora, "Tiny Power Box – Mechanical Investigations for Automotive Very High Power Density Onboard Chargers," PCIM Europe 2023; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremberg, Germany, 2023, pp. 1-9, doi: 10.30420/566091234.

Copyright © Infineon Technologies AG 2024. All rights reserved.

システム インテグリティの強化
熱伝導材料 (TIM) の厚さと圧力が与える影響

パワーデバイスが温度限界内で安全に動作するには、熱伝導材料 (TIM) が効果的に加圧され、対応する表面と確実に熱圧着されることがとても重要です。
この適切な圧力と圧着により熱伝達効率が最大化され、過熱が防止されることで、最適なデバイス性能が維持されます。

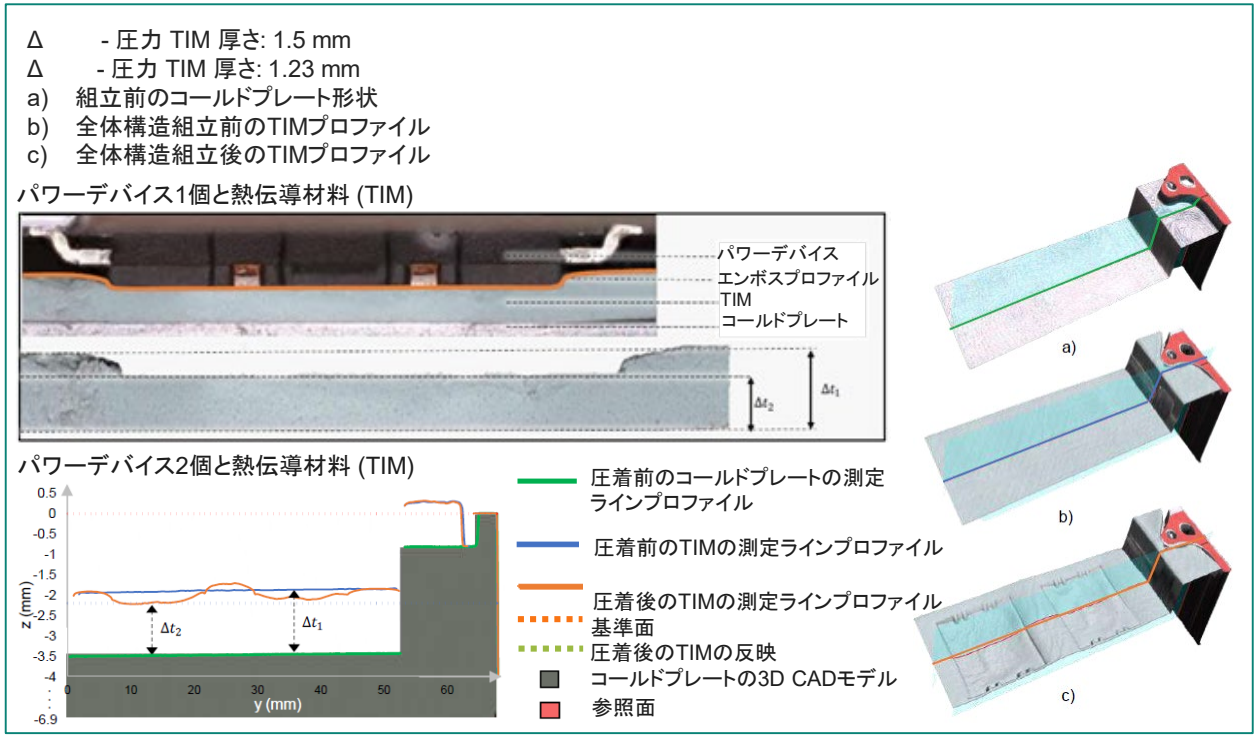


図3: 組立前後のTIMの厚さとたわみ

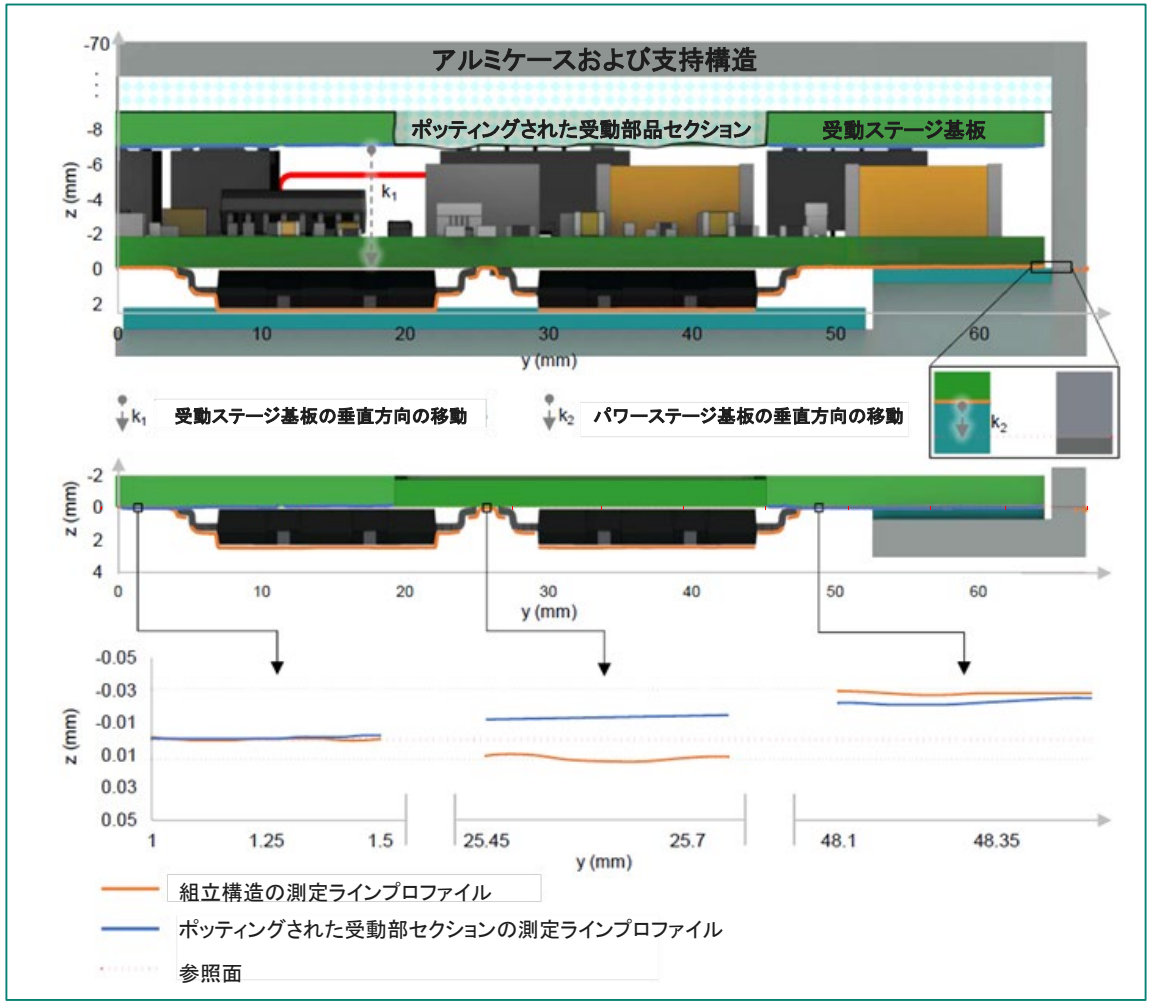
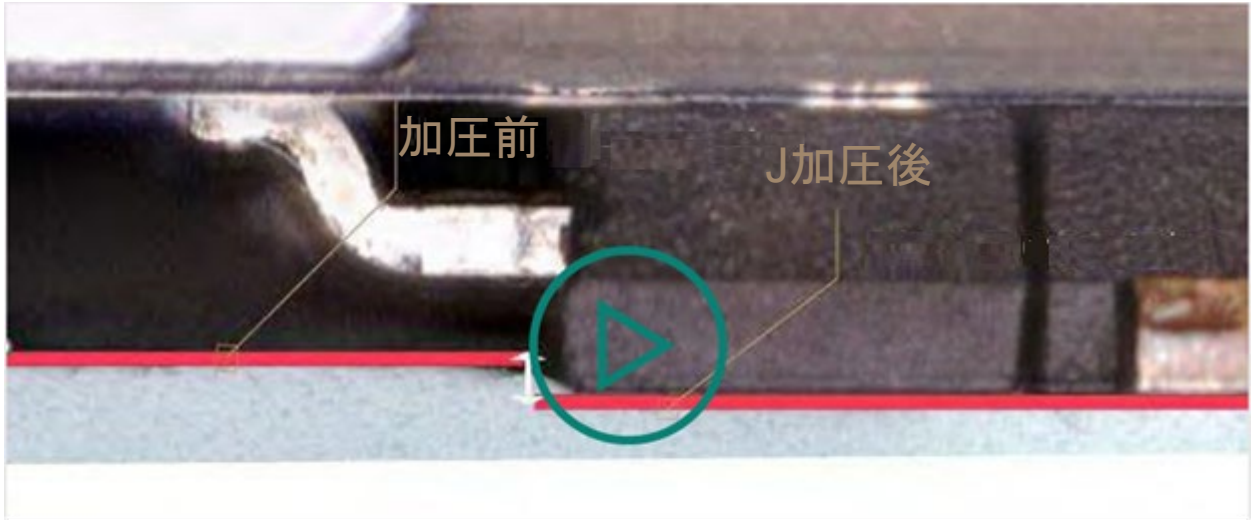


図4: パッシブおよびパワーPCBステージの反り解析用測定ラインプロファイル

Copyright © Infineon Technologies AG 2024. All rights reserved.

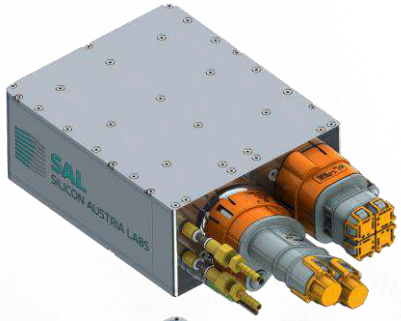
システム インテグリティの強化
熱伝導材料 (TIM) の厚さと圧縮が与える影響



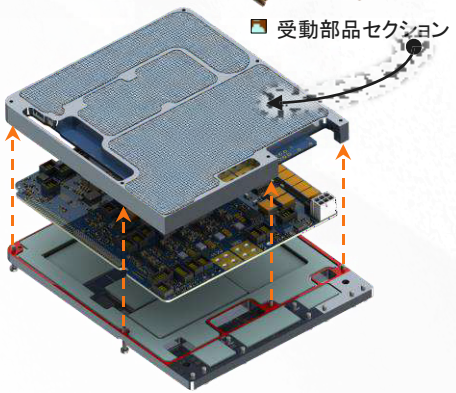
Copyright © Infineon Technologies AG 2024. All rights reserved.

システム インテグリティの強化
クーリング プレート形状と実装の概要

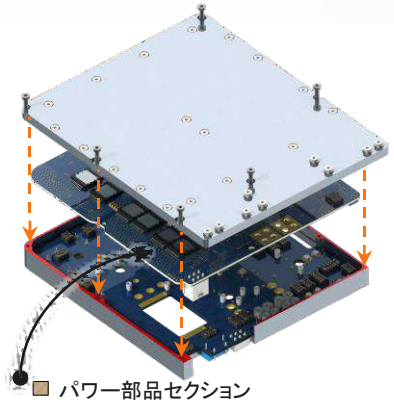
全体組立
コンセプト



組立構造の
上面図

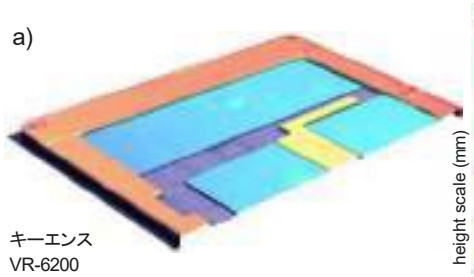


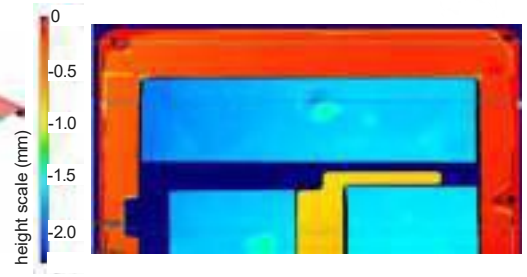
組立構造の
底面図

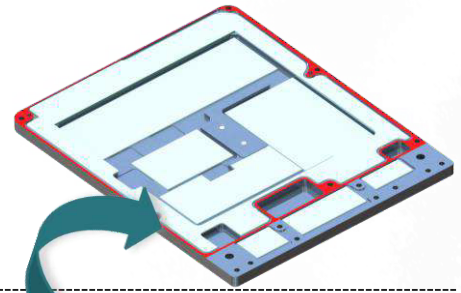


非組立構造の3Dプロファイル – (非加圧熱伝導材料)

a)

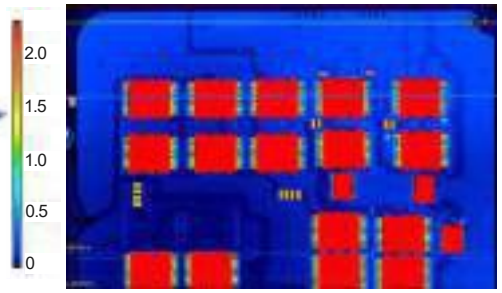


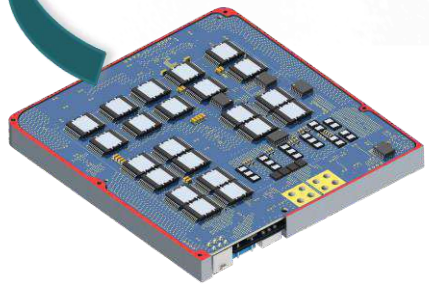




b)

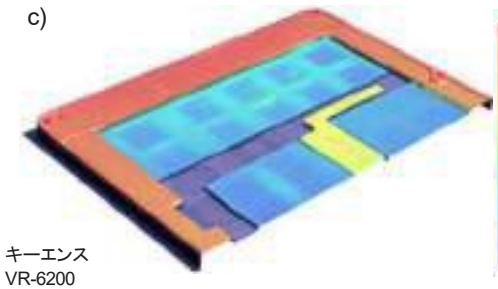


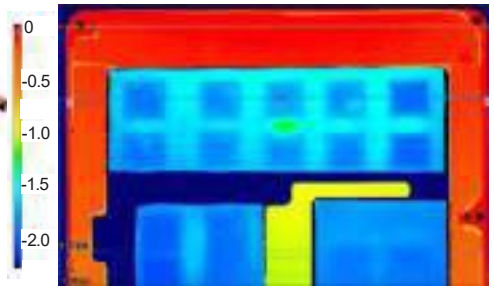




組立構造の3Dプロファイル – (加圧された熱伝導材料)

c)





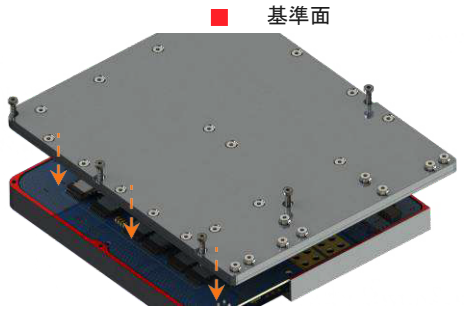


図 5: a) コールドプレートに最初に塗布したTIM の3Dプロファイル測定値、b) ケースに取り付けられたパワーステージ PCB、c) 加圧 されたTIM 構造はエンボス加工されたパワーデバイスを示します。

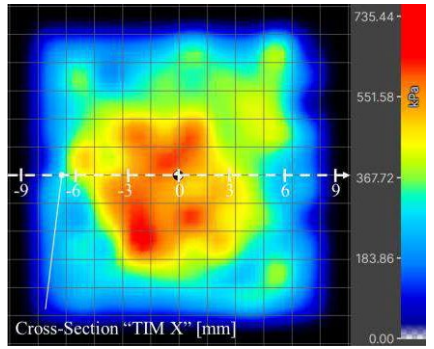
Copyright © Infineon Technologies AG 2024. All rights reserved.

熱機械的インテグリティの強化
理想的な機械的組立シナリオと実際のシナリオ

- **理想的なシナリオ:**
  - PCBとコールドプレートは完全に平坦な状態を保ち、変形は起こりません
  - 熱伝導材料 (TIM) は表面全体に均一に加圧されます

- **PCB反り発生シナリオ:**
  - PCBの反りが熱伝導材料 (TIM) の不均一な加圧を引き起こし、熱的接触が不十分な領域を生じさせます
  - 接触が均一でないため特定領域において熱抵抗を増加させ、全体的な放熱が低下します

- **コールドプレートの反りシナリオ:**
  - コールドプレートの反りは、PCBの反りと同じで、熱伝導材料(TIM) の不均一な加圧を引き起こすことがあります
  - コールドプレートとパワーデバイス間で接触の良くない部分は、局所的なホットスポットを生じさせ、部品の過熱リスクを高めます



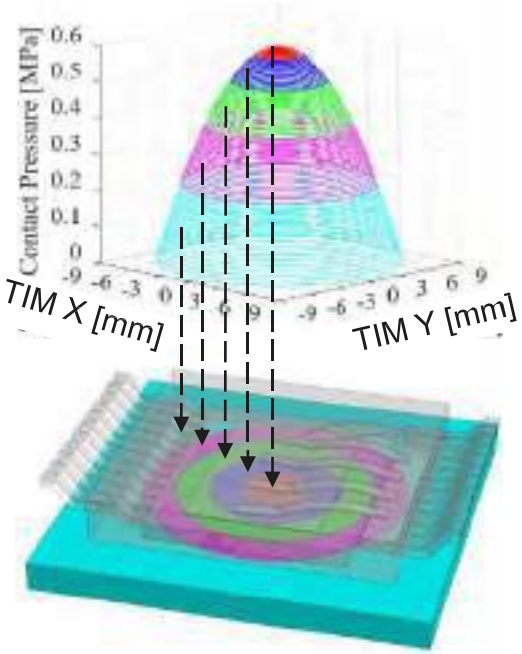
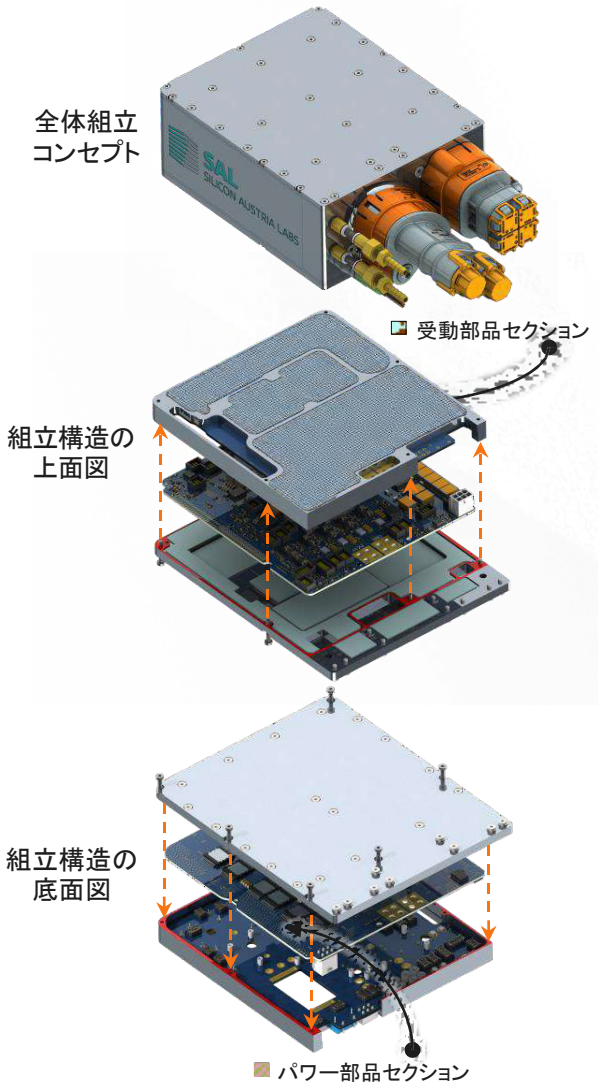


図6:接触圧力の変化に基づいて熱抵抗を最適化するためにセグメント化されたTIMパッチ

Copyright © Infineon Technologies AG 2024. All rights reserved.

熱機械的インテグリティの強化
安定性と冷却においてポッティングが担う重要な役割



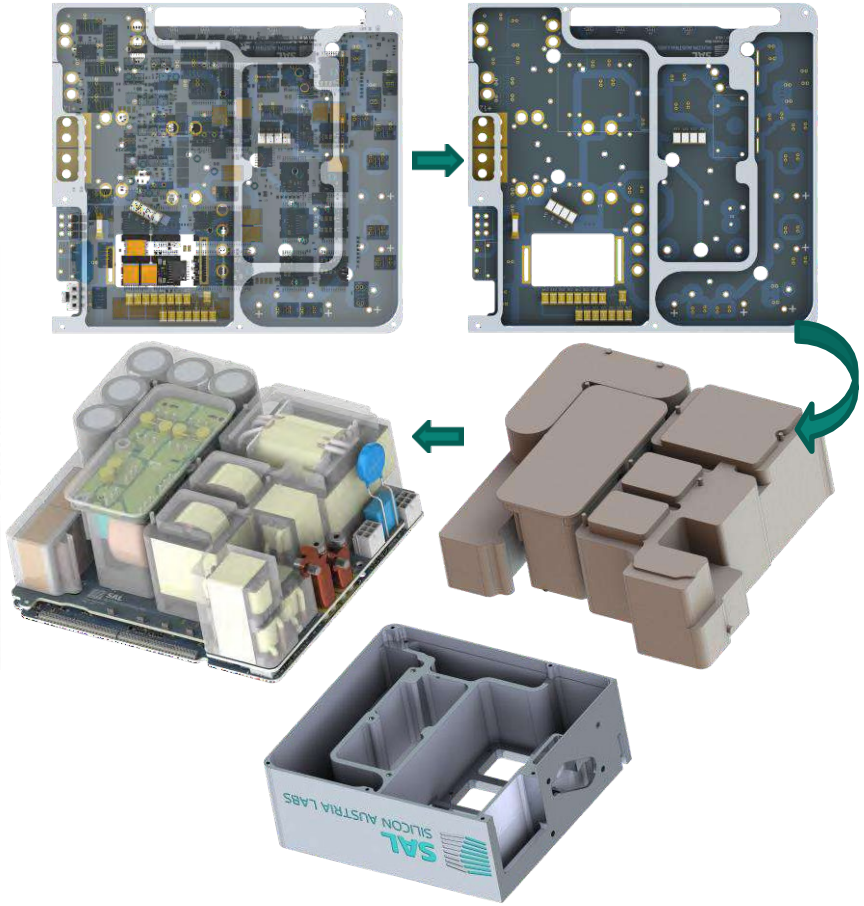
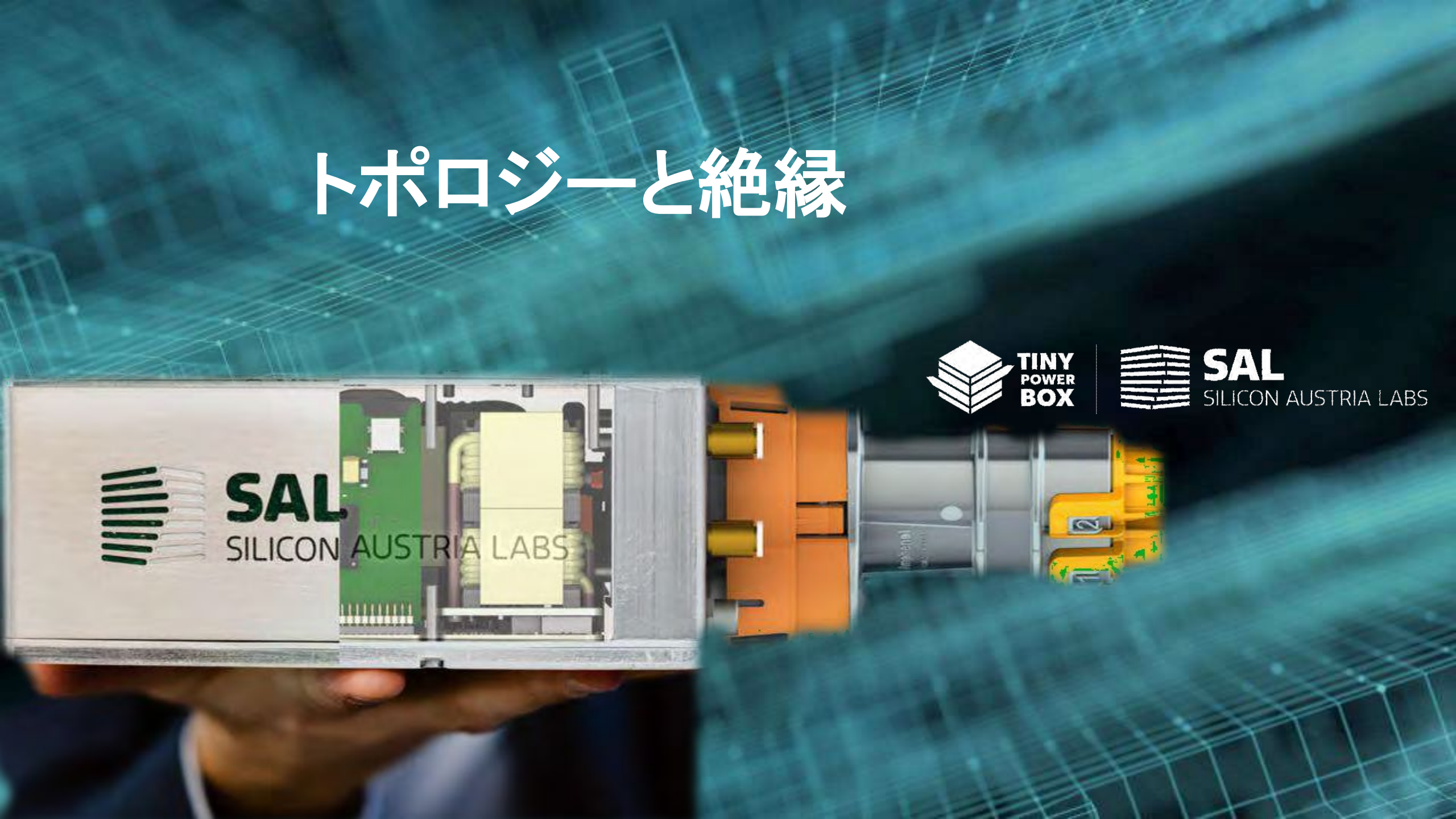


図7: 受動部品にポッティングを行うことで、効果的に熱管理できます。アルミニウム壁は機械的安定性を提供すると同時に、冷却システムに効率的に熱を導きます。

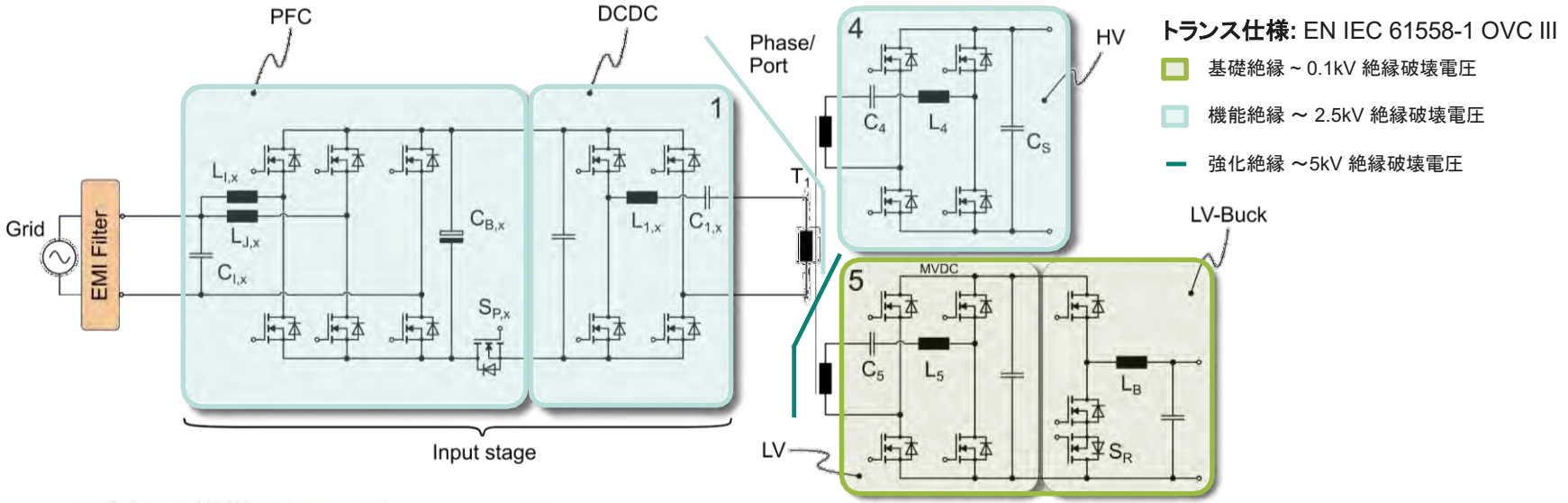
- **システムのポッティング**には、熱管理と機械的安定性のみならず複数の利点があります
- **耐振動および耐衝撃性:** ポッティング材は振動や衝撃を吸収・分散し、故障の原因となる機械的ストレスから部品を保護します
- **電気絶縁:** ポッティングは電気絶縁体として機能し、短絡を防ぎ、システム全体の安全性を向上させます
- **ノイズと干渉を低減**: ポッティングはノイズの低減と電磁干渉の低減をに寄与し、より安定した信頼性の高いシステム性能を実現します

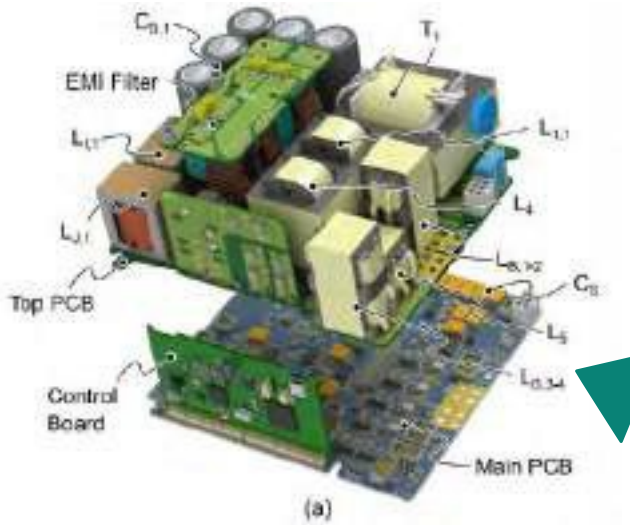
Copyright © Infineon Technologies AG 2024. All rights reserved.

トポロジーと絶縁

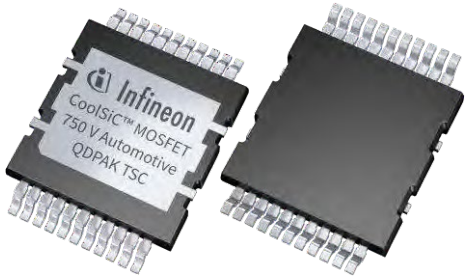

TINY
POWER
BOX
SAL
SILICON AUSTRIA LABS
SAL
SILICON AUSTRIA LABS

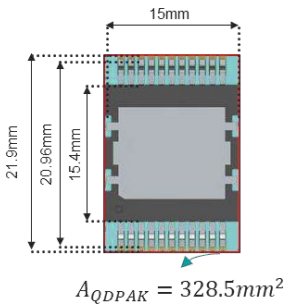
トポロジーと絶縁
単相 OBC + DCDC 車載アプリケーション用バージョン





上面放熱 750 V SiC MOSFET





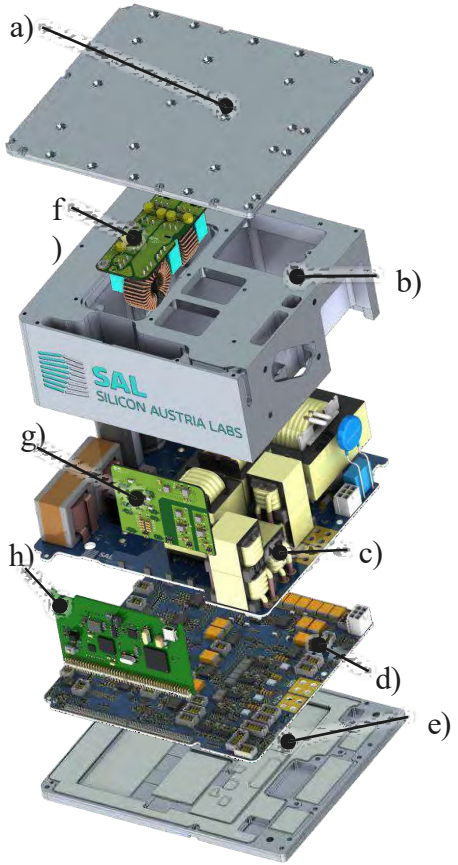
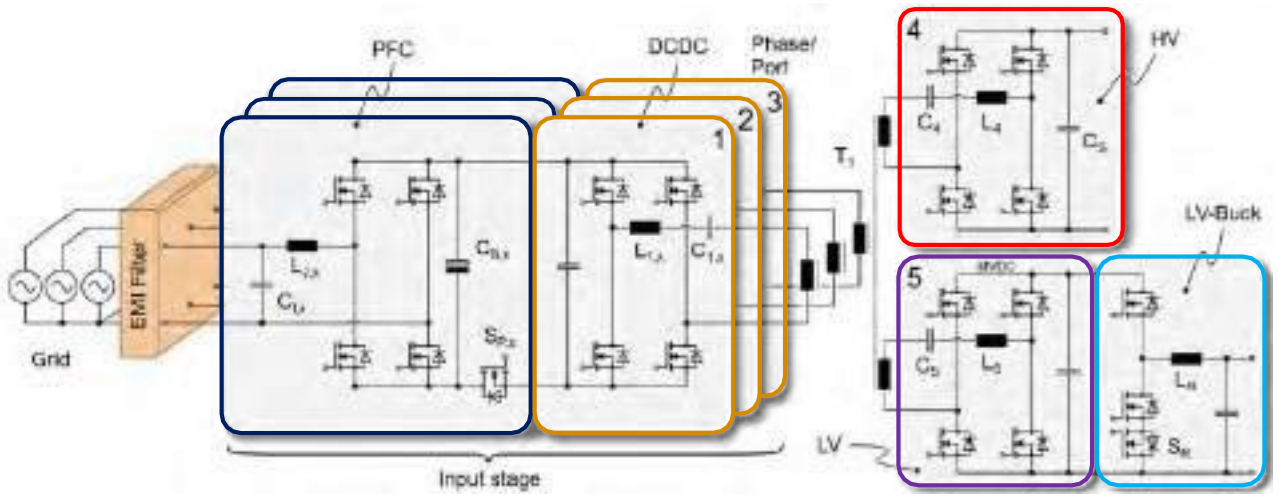
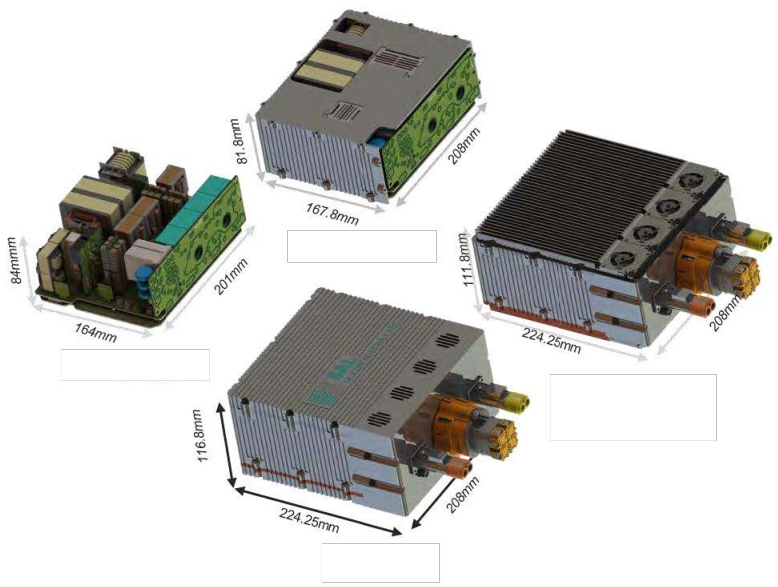


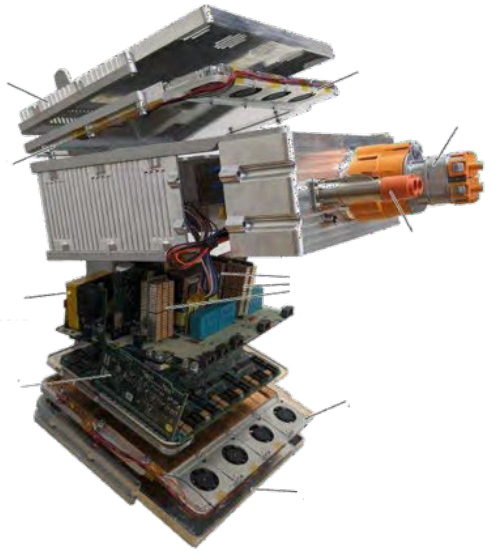
図 8: 車載用 OBC アプリケーション向けの、液冷を搭載したアセンブリの全体コンセプト。a) 上面放熱システム、b) アルミニウムパッケージ、c) 受動ステージ、d) パワーステージ、e) 下面放熱システム、f) 熱伝導材料、g) 補助電源ボード、h) 制御ボード、i) EMI フィルタボード

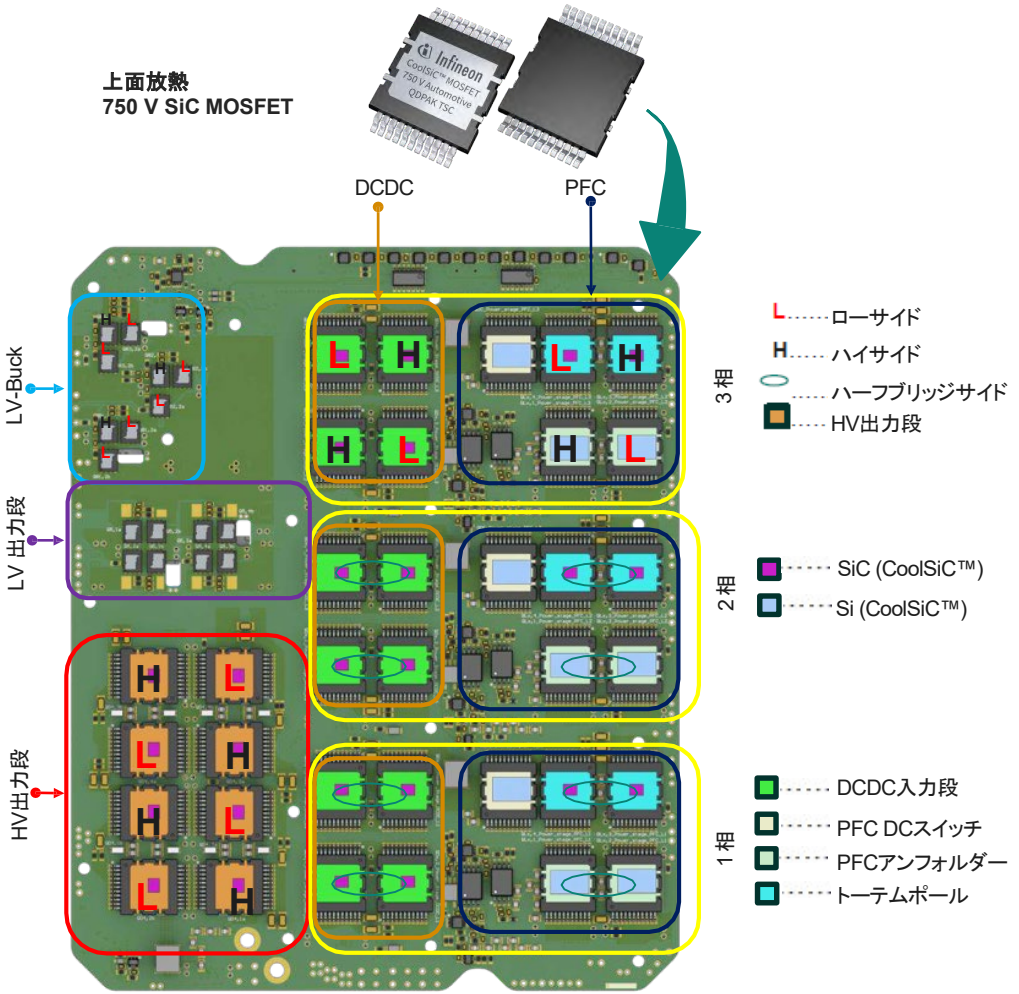
Copyright © Infineon Technologies AG 2024. All rights reserved.

トポロジーと絶縁
三相 OBC + DCDC 産業アプリケーション用バージョン









Copyright © Infineon Technologies AG 2024. All rights reserved.

トポロジーと絶縁
異なる熱伝導材料アプローチと冷却への影響

一般的に絶縁フォイルを使用しない場合は熱抵抗が低く、パワーデバイスからヒートシンクへの熱伝導効率を高め、冷却性能を向上させます。

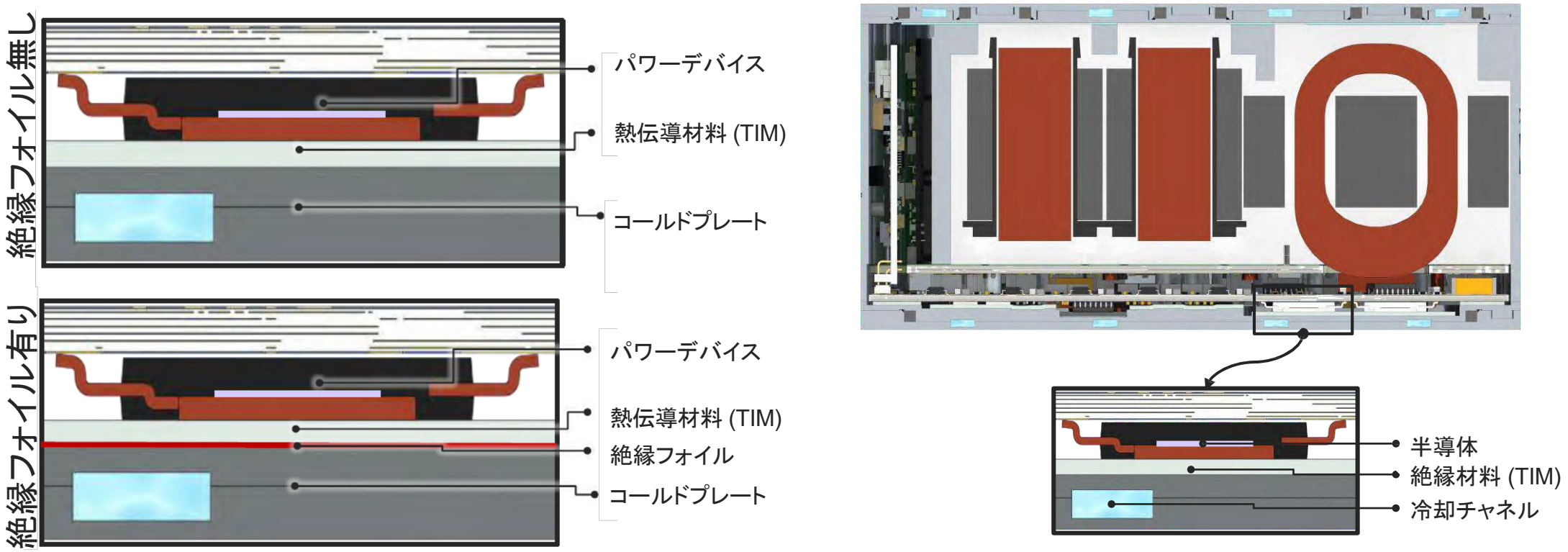
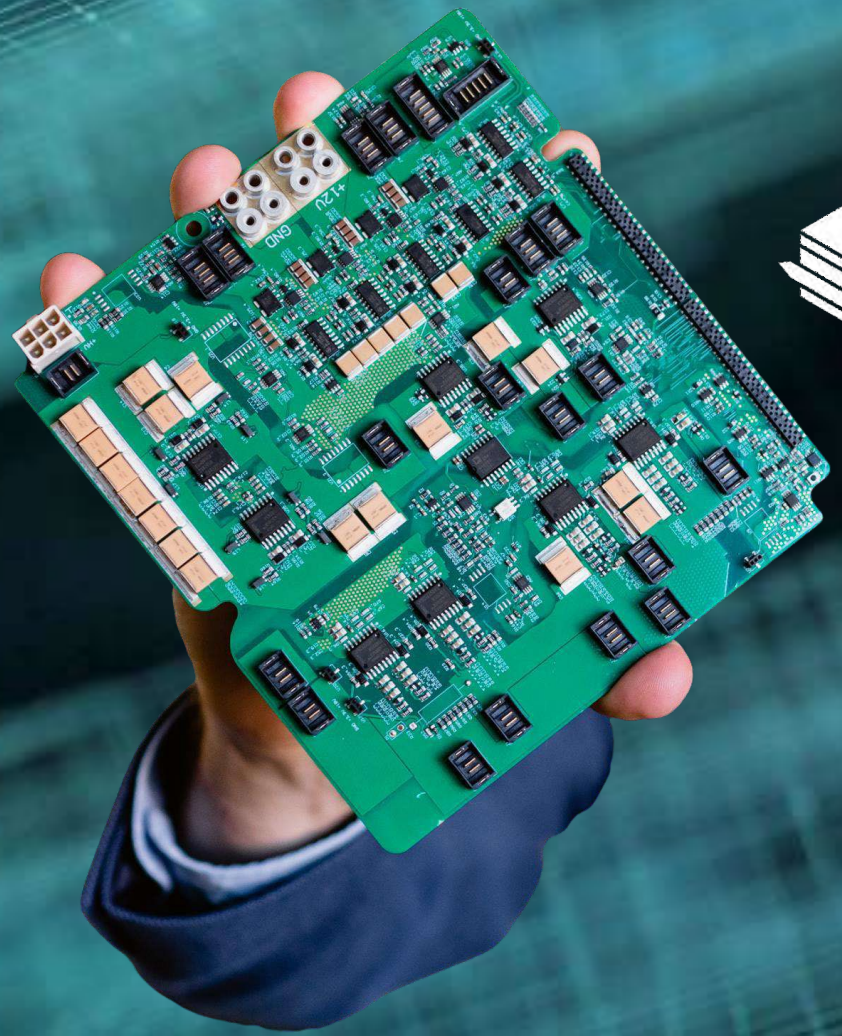


図 9: 電気絶縁用の絶縁層の追加にハイライトした、絶縁フォイルありと絶縁フォイルなしのアセンブリ断面の比較

Copyright © Infineon Technologies AG 2024. All rights reserved.

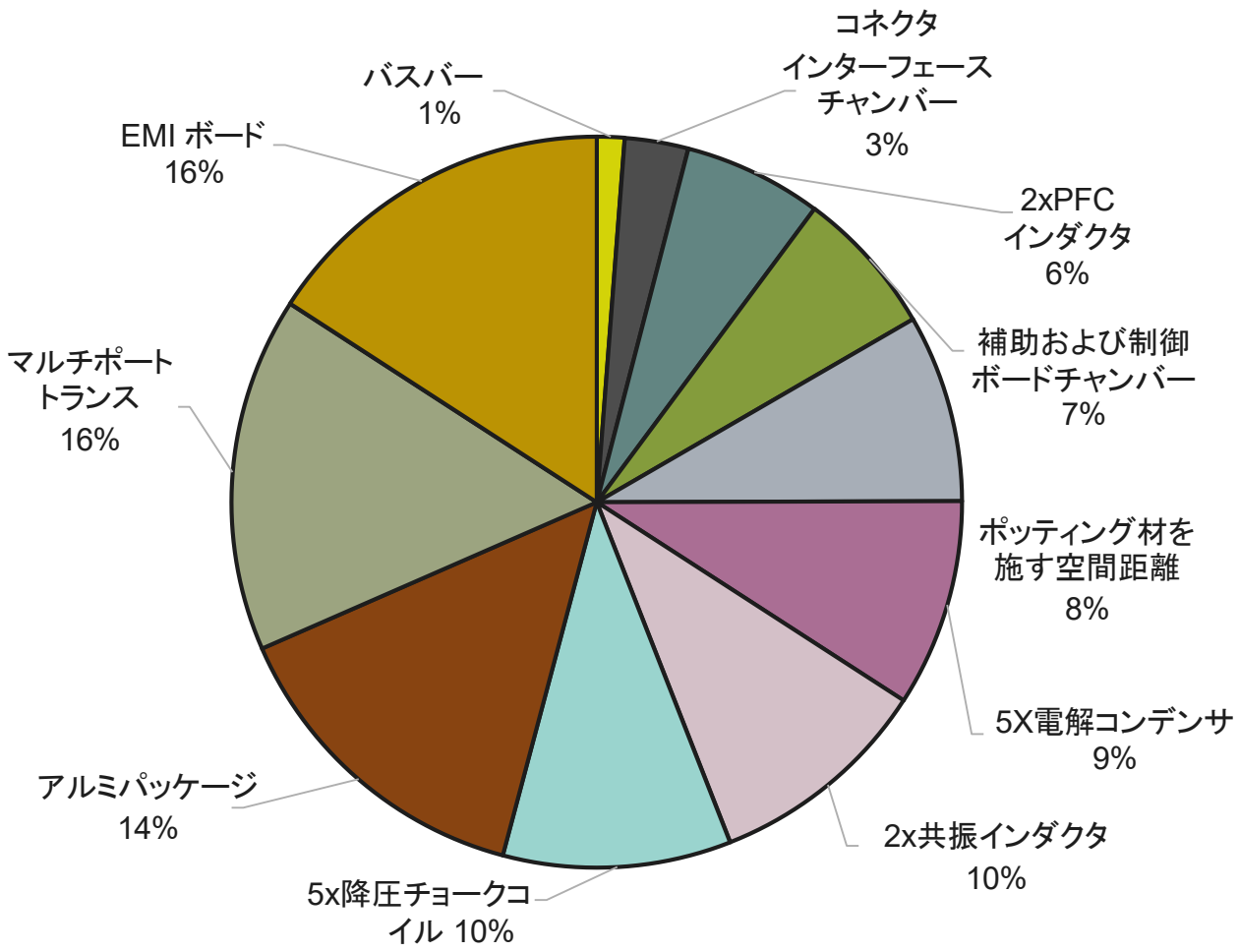
最適な部品配置

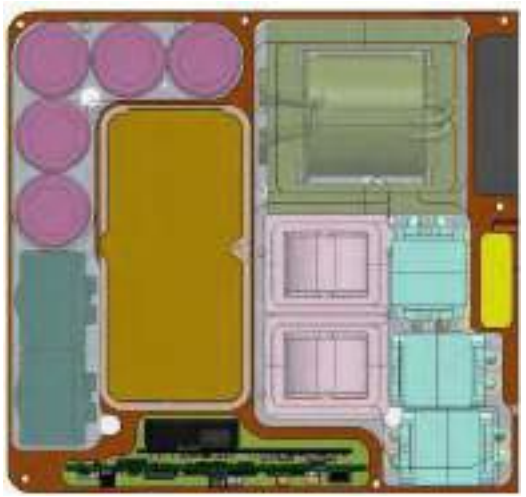


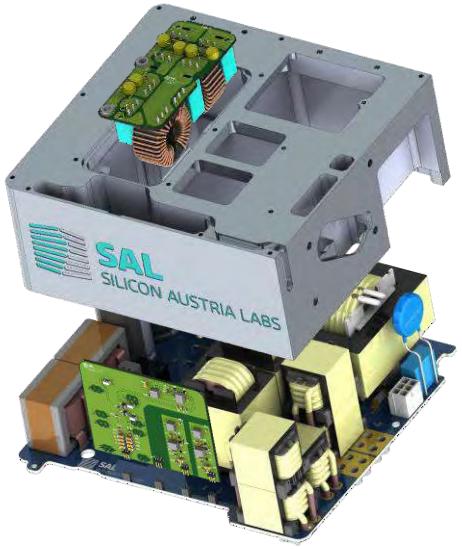
TINY POWER BOX

SAL
SILICON AUSTRIA LABS

受動ステージ領域における最適な部品配置





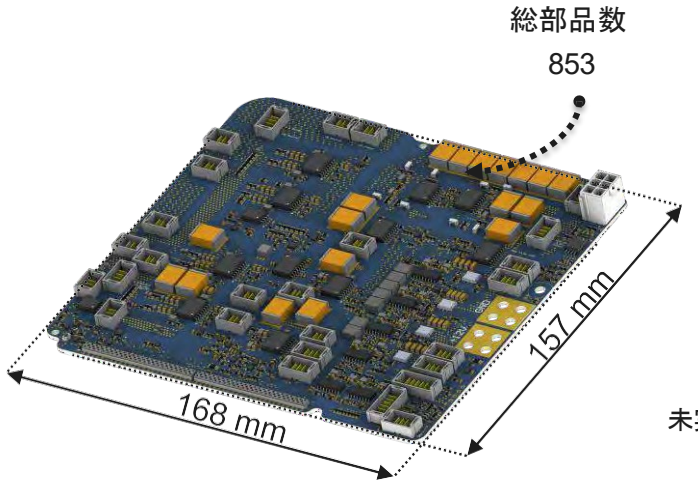


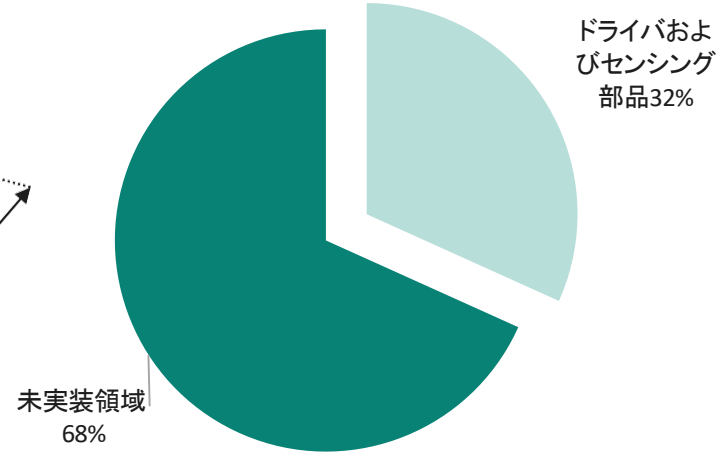
- 受動ステージによって、システム全体の部品が占める表面の形状が決まります
- 受動部品の大きさによってサイズ制限を設定します
- 部品の配置がない領域では、パッケージと電子部品の間に最低でも1～2mmの空間距離を設けて、部品周囲に均一にポッティング材が流れるようにする必要があります
- 提案されたOBCに受動部品を組み込む場合、全体の体積を減らす余地がないのは、このためです

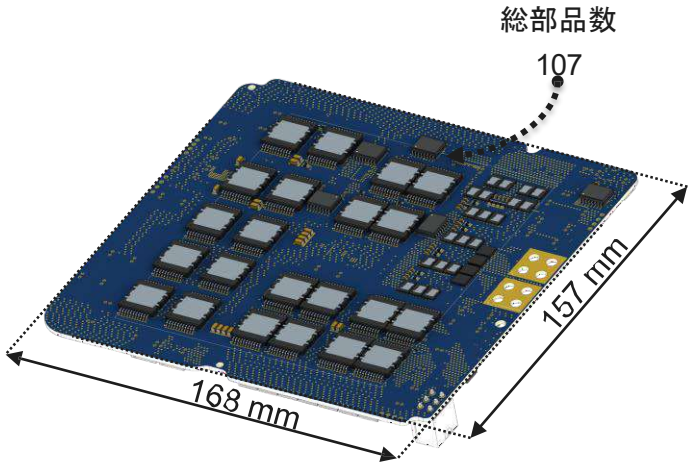
Copyright © Infineon Technologies AG 2024. All rights reserved.

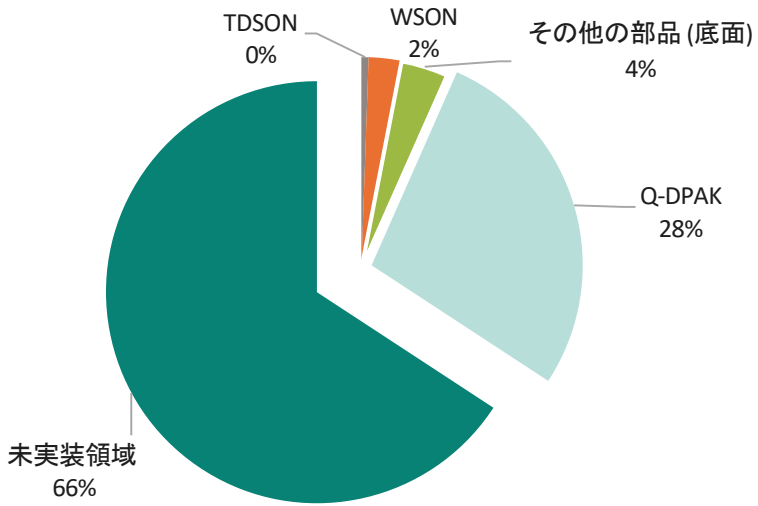
能動ステージ領域における最適な部品配置

- 受動ステージによって決まる使用可能な面積が、能動ステージのPCBサイズに直接影響を与えます
- PCB上の未実装領域は、沿面距離と空間距離を確保できるよう意図的に空けてあります
- 未実装領域は、沿面距離と空間距離を確保し、絶縁破壊や故障のリスクを低減します



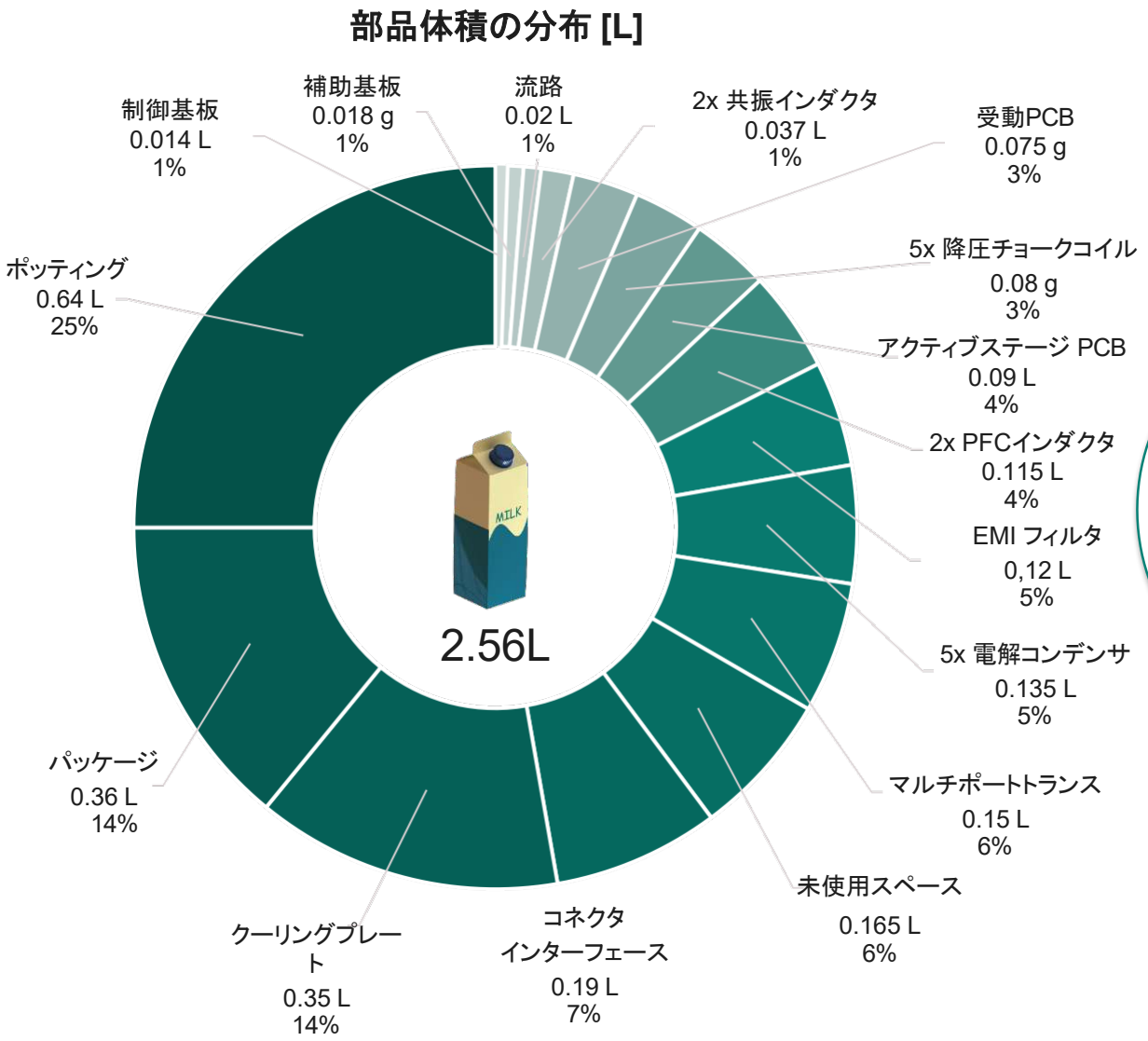


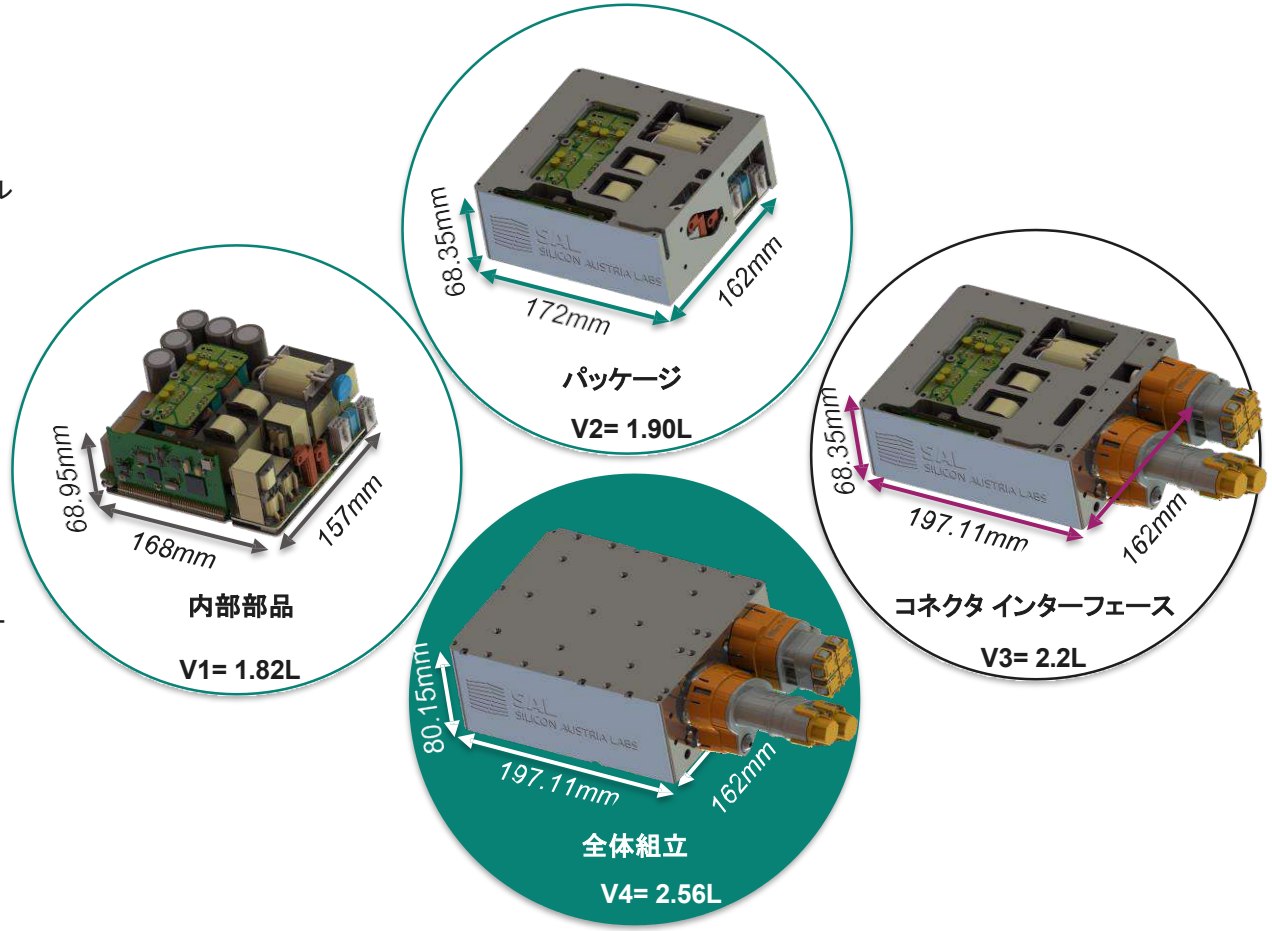




Copyright © Infineon Technologies AG 2024. All rights reserved.

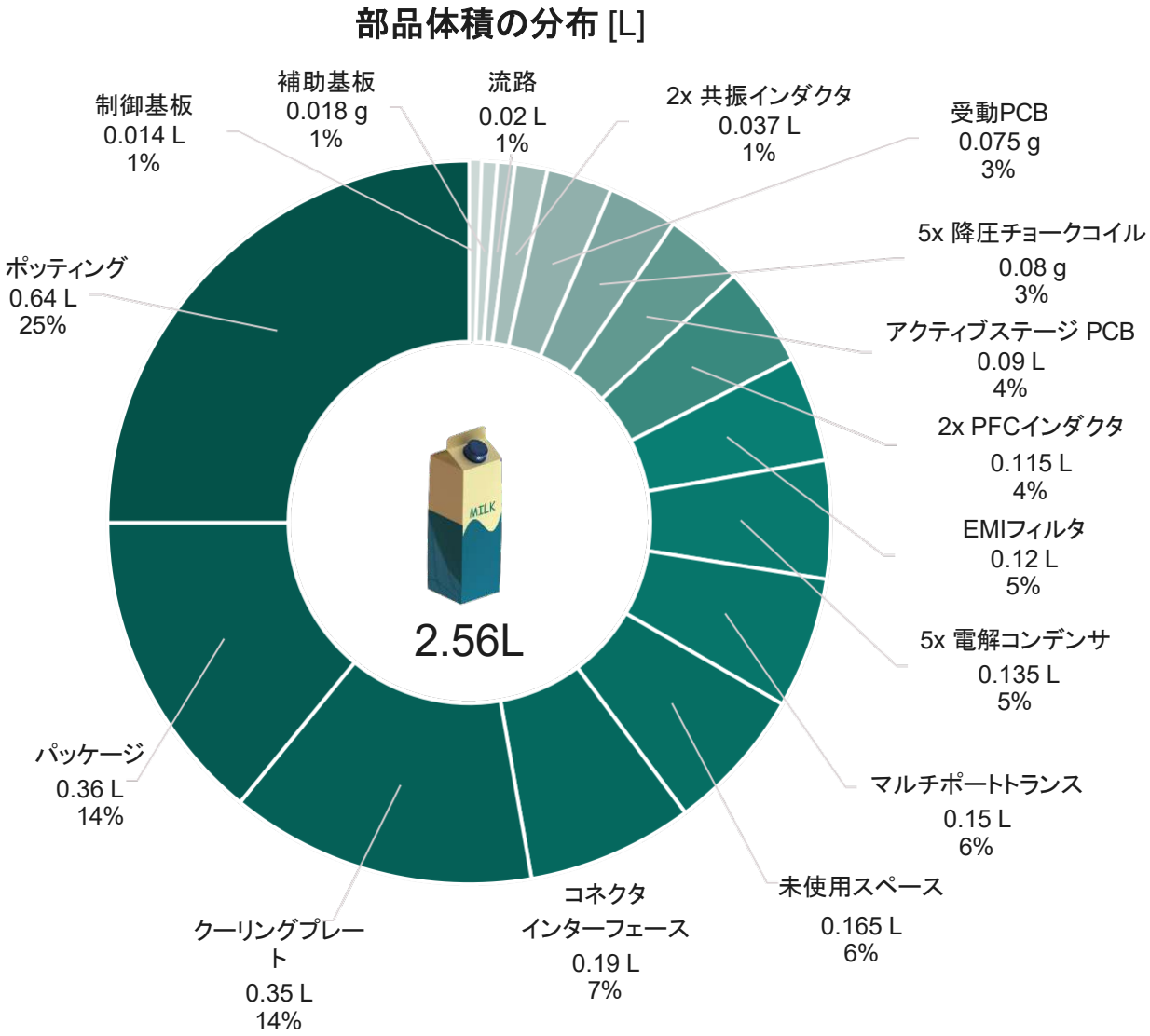
部品体積の分布 (部品の内部、パッケージ、コネクターを含む)

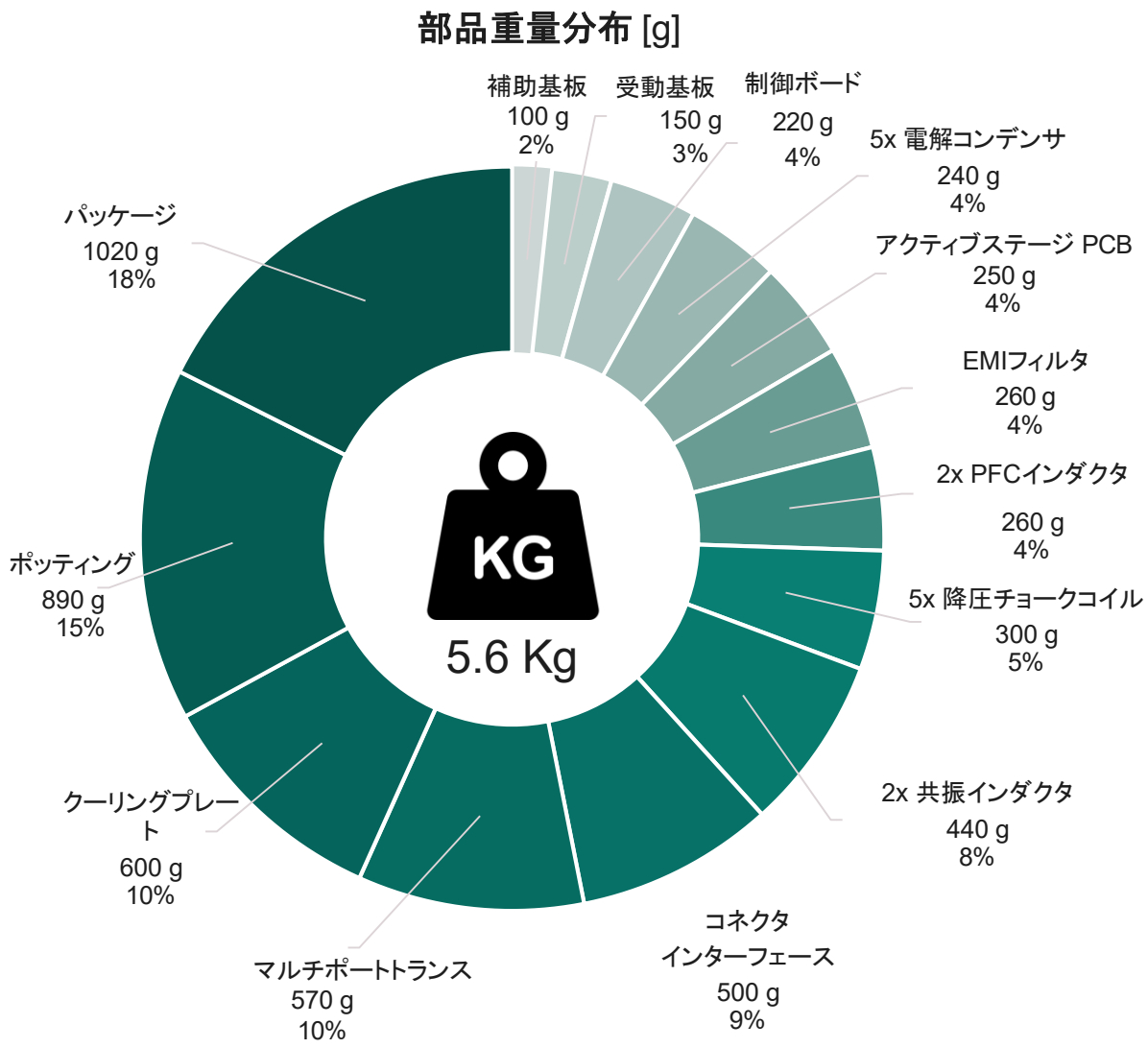




Copyright © Infineon Technologies AG 2024. All rights reserved.
F. Vollmaier et al., "Tiny Power Box - Exploiting Multiport Series Resonant Topologies for Very High Power Density Onboard Chargers," PCIM Europe 2022; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremberg, Germany, 2022, pp. 1-9, doi: 10.30420/565822017.

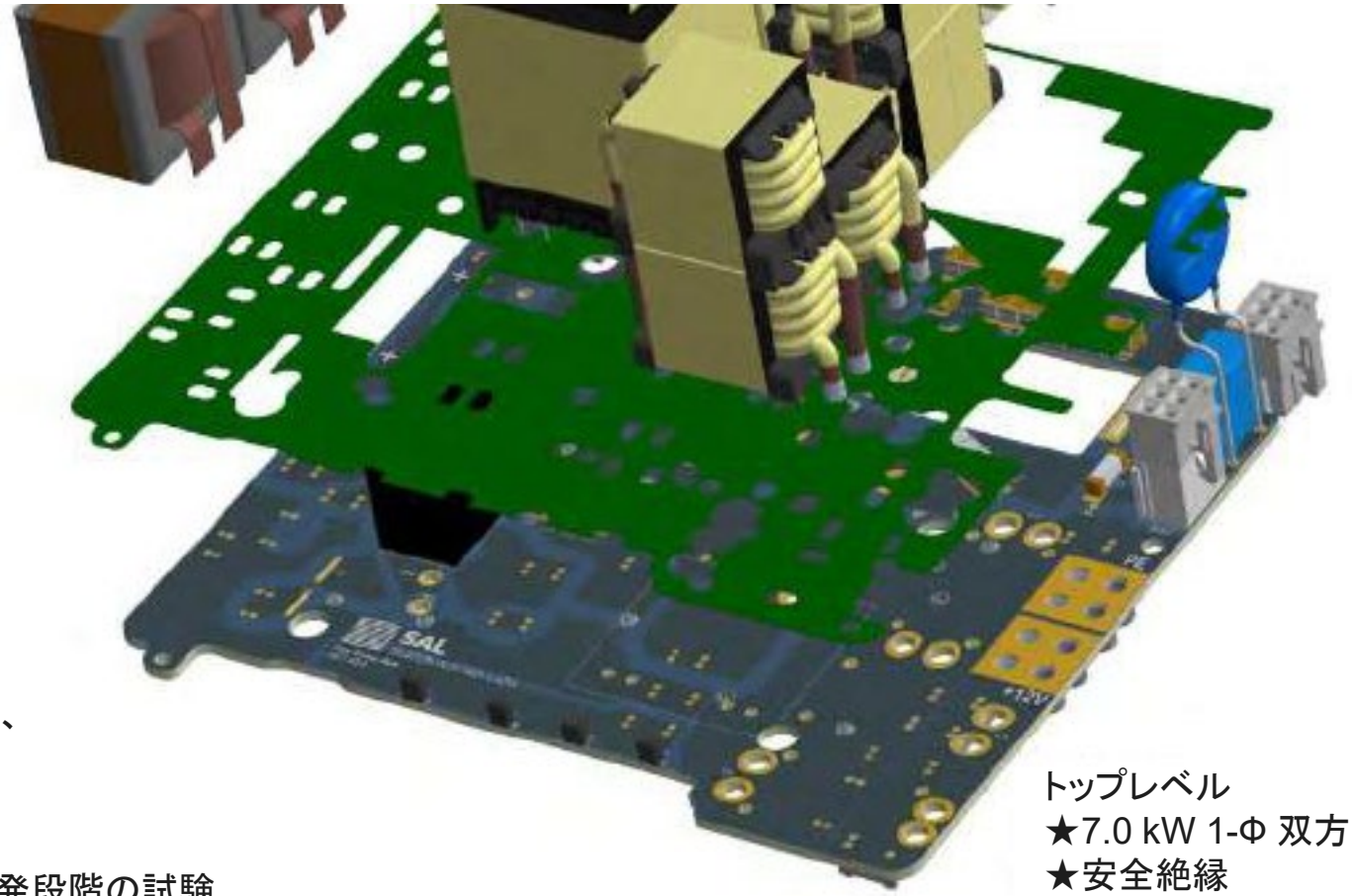
部品の体積と重量分布
デモンストレーターの全体像





Copyright © Infineon Technologies AG 2024. All rights reserved.

システム組立手順の詳細

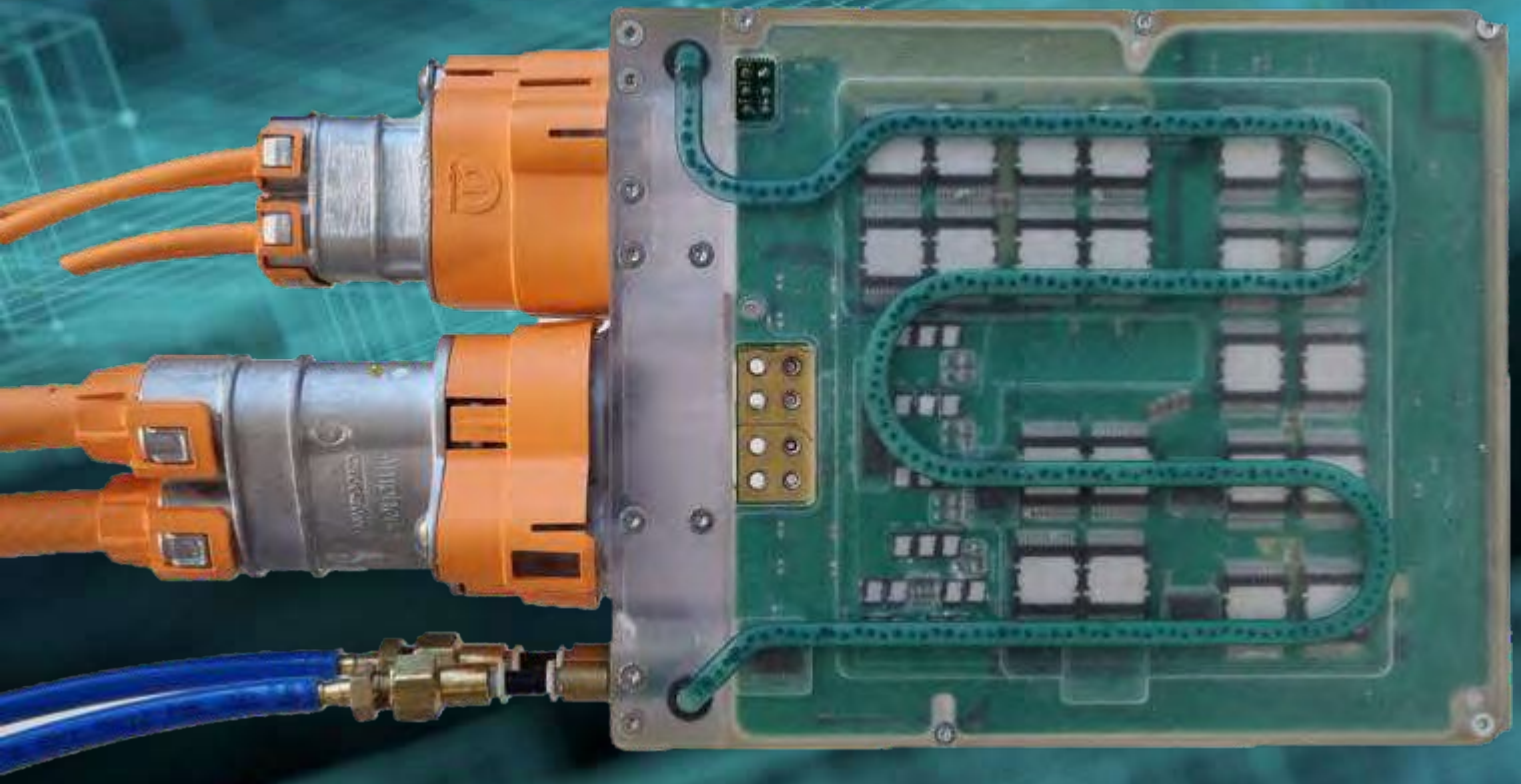


トポロジー最適化、
システム設計、
EMC設計、
制御開発、
シミュレーションおよび研究開発段階の試験

トップレベル
★7.0 kW 1-Φ 双方向 AC-DC/DC-DC
★安全絶縁
★97.5% 総ピーク効率
★2.24リットル (ケースを除く) (3.1 kW/L)
★1.95リットル (ケースを含む) (3.6 kW/L)

Copyright © Infineon Technologies AG 2024. All rights reserved.

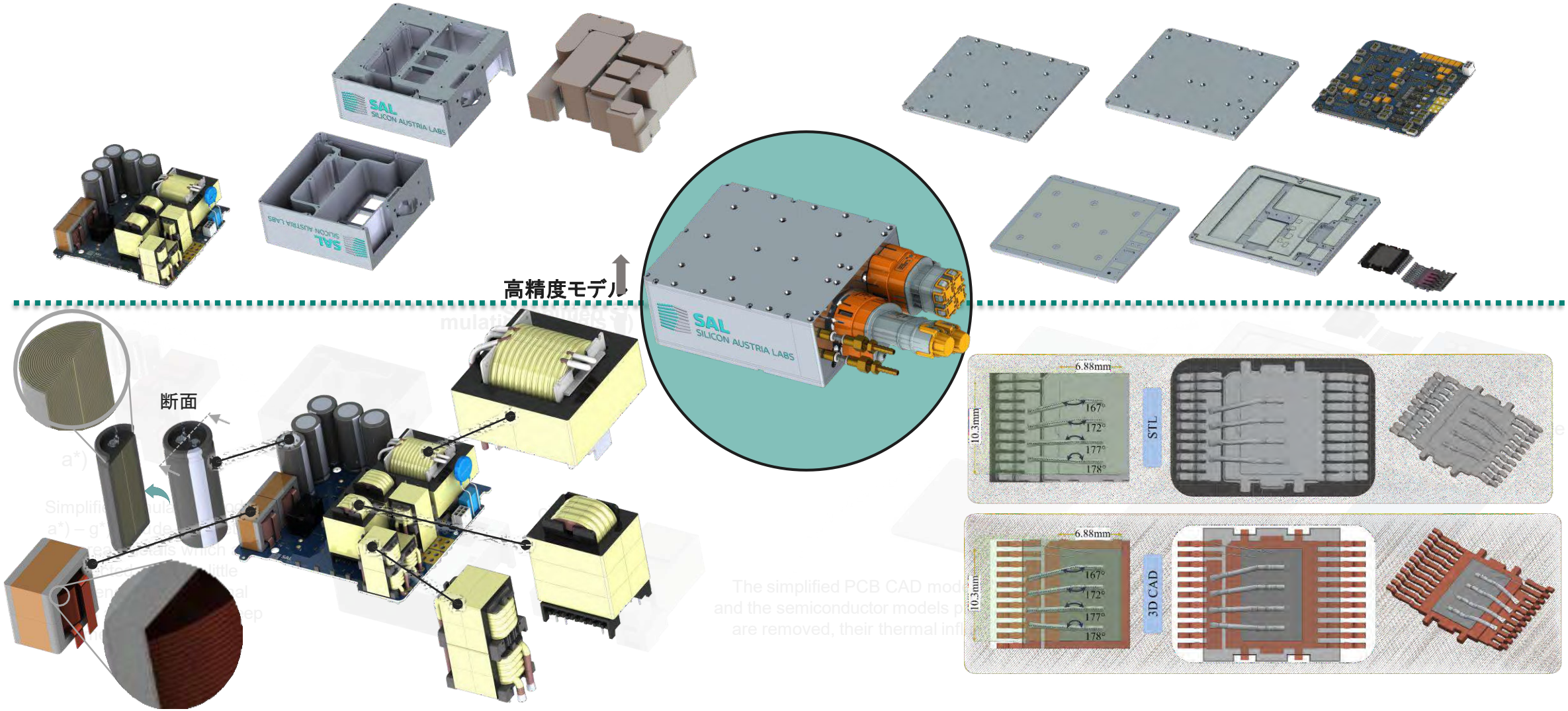
熱／機械シミュレーション



TINY POWER BOX

SAL
SILICON AUSTRIA LABS

熱／機械シミュレーション

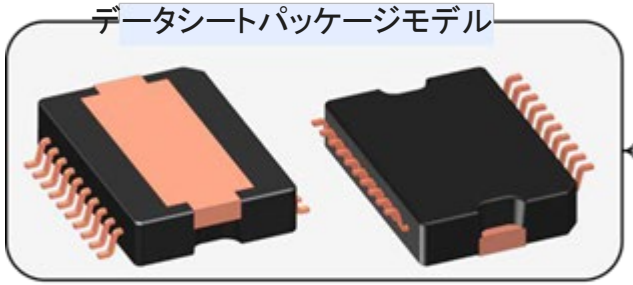


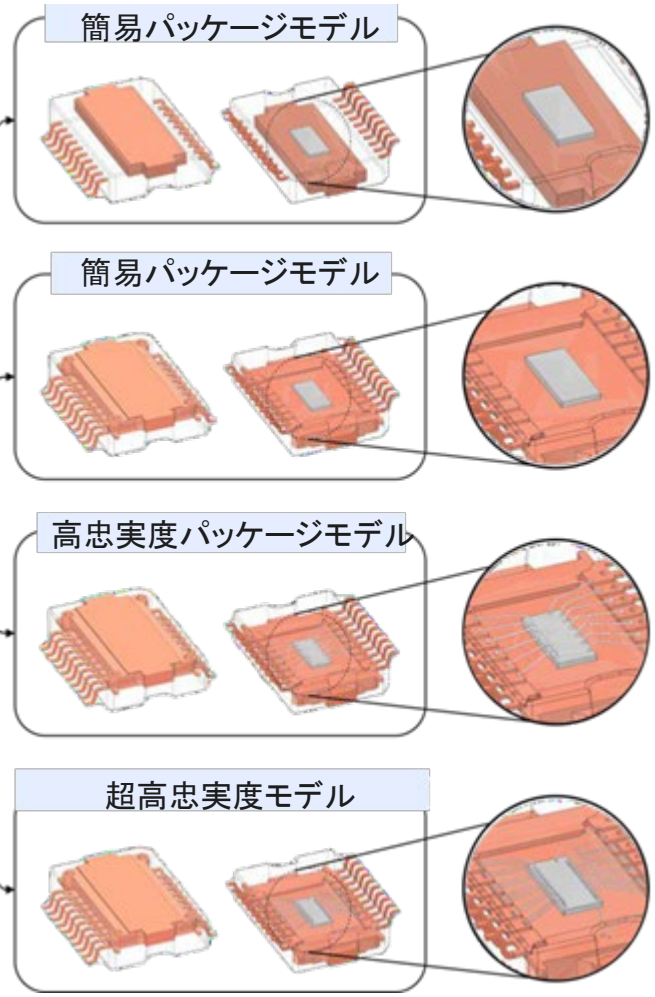
Copyright © Infineon Technologies AG 2024. All rights reserved.

熱／機械シミュレーション
デバイス モデリングにおける深さの影響

以下に示すモデルによって得られた定常状態の熱解析結果:

- 異なる忠実度レベル
- 同一の境界条件
- 材料特性
- そしてMESHの設定





組立試験装置	温度 (℃)			
	ダイ	差分率 %	コンデンサ	差分率 %
簡易モデル	126.5	100%	60.0	100%
詳細モデル	124.8	↓1.34%	83.9	↑39.8%
高忠実度モデル	124.7	↓1.42%	85.0	↑41.6%
超高忠実度モデル	124.9	↓1.26%	85.0	↑41.6%

- **簡易パッケージングモデル**は、データシート情報のみに基づき、二次的な熱流を捉えきれません。
- **高忠実度パッケージモデル**
  - 正確な熱シミュレーション解析に必要な**ボンディングワイヤ、リードフレーム、ヒートスラグ**などの機能があります。
  - .簡易モデルよりもはるかに良好に熱クロストークを捕捉します。**近接配されたセラミックコンデンサの温度**が著しく上昇する例がそれを示しています。
- 正確にモデル化されたリードフレームは、周囲に伝わる**熱流束**の量に**深刻な影響**をもたらします。

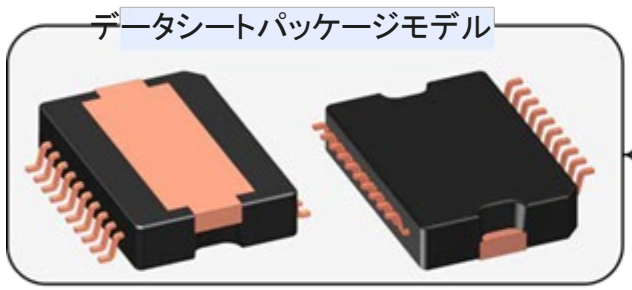
C. Mentin, I. Recepi and T. Polom, "High Fidelity Package Simulation Models Capturing Accurate Thermal Cross-Coupling," 2020 26th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC), Berlin, Germany, 2020, pp. 97-103, doi: 10.1109/THERMINIC49743.2020.9420498. keywords: {Heating systems;Analytical models;Capacitors;Predictive models;Lead;Electronic packaging thermal management;Data models},

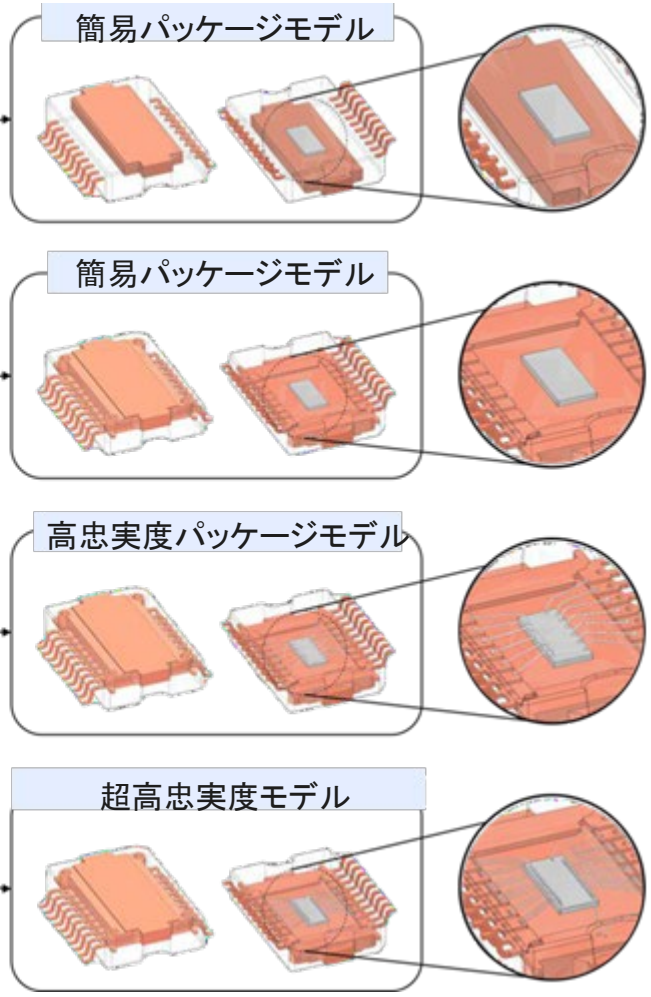
Copyright © Infineon Technologies AG 2024. All rights reserved.

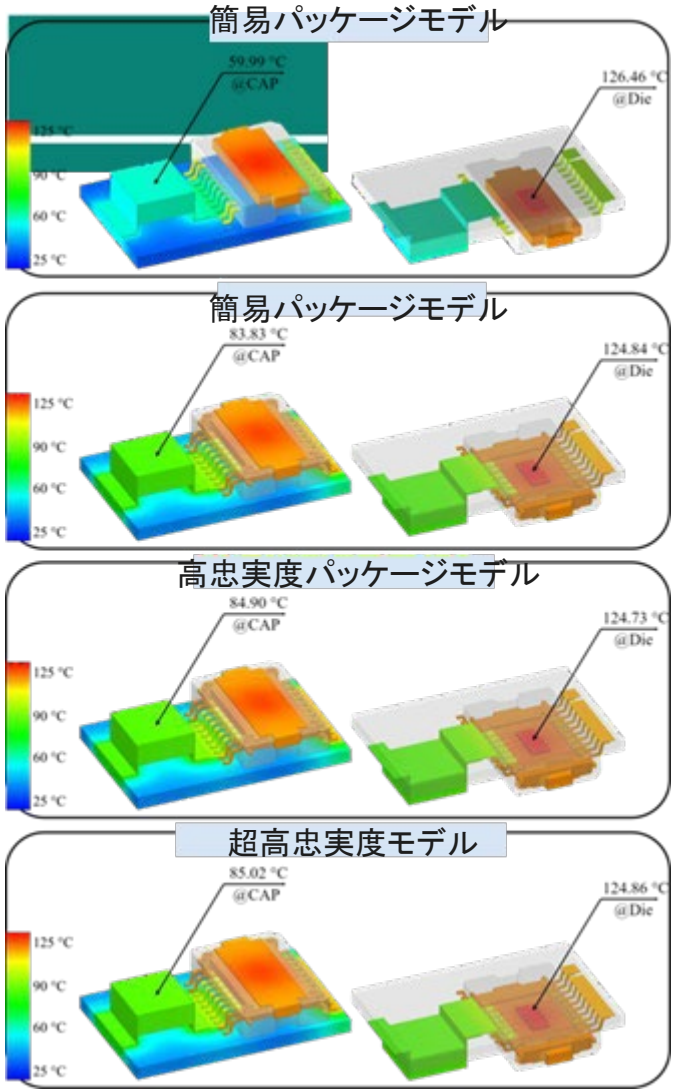
熱／機械シミュレーション
デバイス モデリングにおける深さの影響

以下に示すモデルによって得られた定常状態の熱解析結果:

- 異なる忠実度レベル
- 同一の境界条件
- 材料特性
- そしてMESHの設定







組立試験装置	温度 (℃)			
	ダイ	差分率 %	コンデンサ	差分率 %
簡易モデル	126.5	100%	60.0	100%
詳細モデル	124.8	↓1.34%	83.9	↑39.8%
高忠実度モデル	124.7	↓1.42%	85.0	↑41.6%
超高忠実度モデル	124.9	↓1.26%	85.0	↑41.6%

Copyright © Infineon Technologies AG 2024. All rights reserved.

熱／機械シミュレーション
クーリング プレートおよびチャネルの設計バリエーション - I

- **ベースプレート:** 熱伝導率の高いアルミ合金A6063で作られ、熱源と冷却液の主要インターフェースとして機能します。
- **冷却チャネル:** ベースプレート内に埋め込まれ、冷却液が流れるようにしています。チャネルの設計には、パターンやピン構造などのバリエーションがあります。
- **シーリング機構:** ゴム製シーリングが防水バリアを形成し、冷却液が確実にコールドプレート内に流れるようにします。
- **実装機構:** コールドプレートには取付用の穴があり、熱伝導材料 (TIM) およびアルミケースに確実に固定できるようになっています。

パターンチャネル



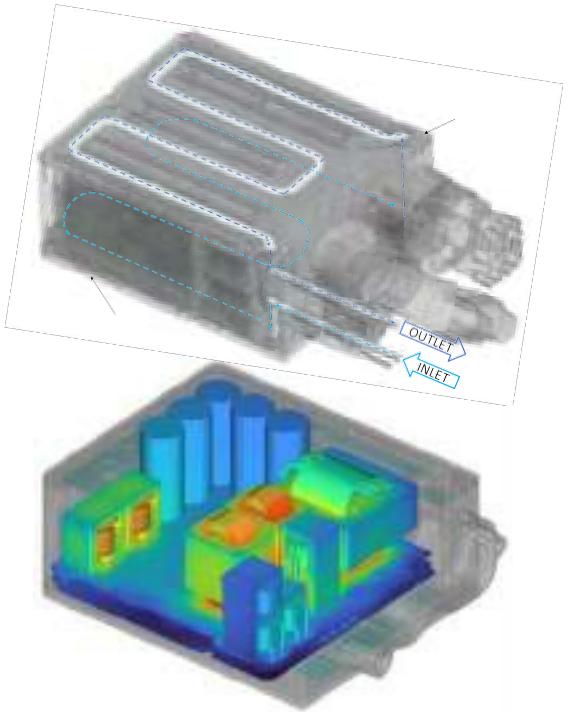
ピン構造

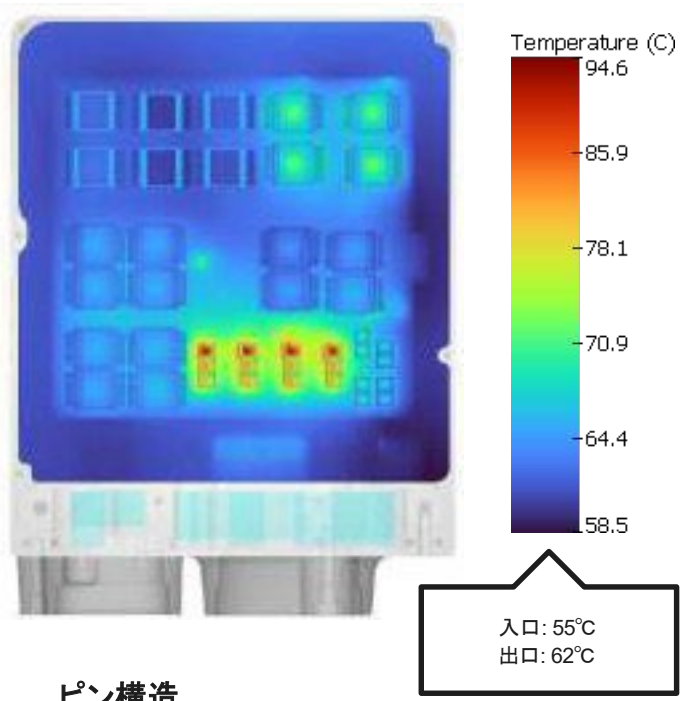


Copyright © Infineon Technologies AG 2024. All rights reserved.

熱／機械シミュレーション
クーリング プレートおよびチャネルの設計バリエーション - II

– 冷却液はシステムに流れると、底部コールドプレートから循環を開始します。
  – **底面のコールドプレート**は**アクティブステージ**を冷却します。
– 次に水冷液はチャネル内を移動して一番上のコールドプレートに到達します。
  – **上面のコールドプレート**は**パッシブステージ**を冷却します。
– この冷却プロセスは、3D流路を活用するため単一入力-単一出力として行われます。





パターンチャネル

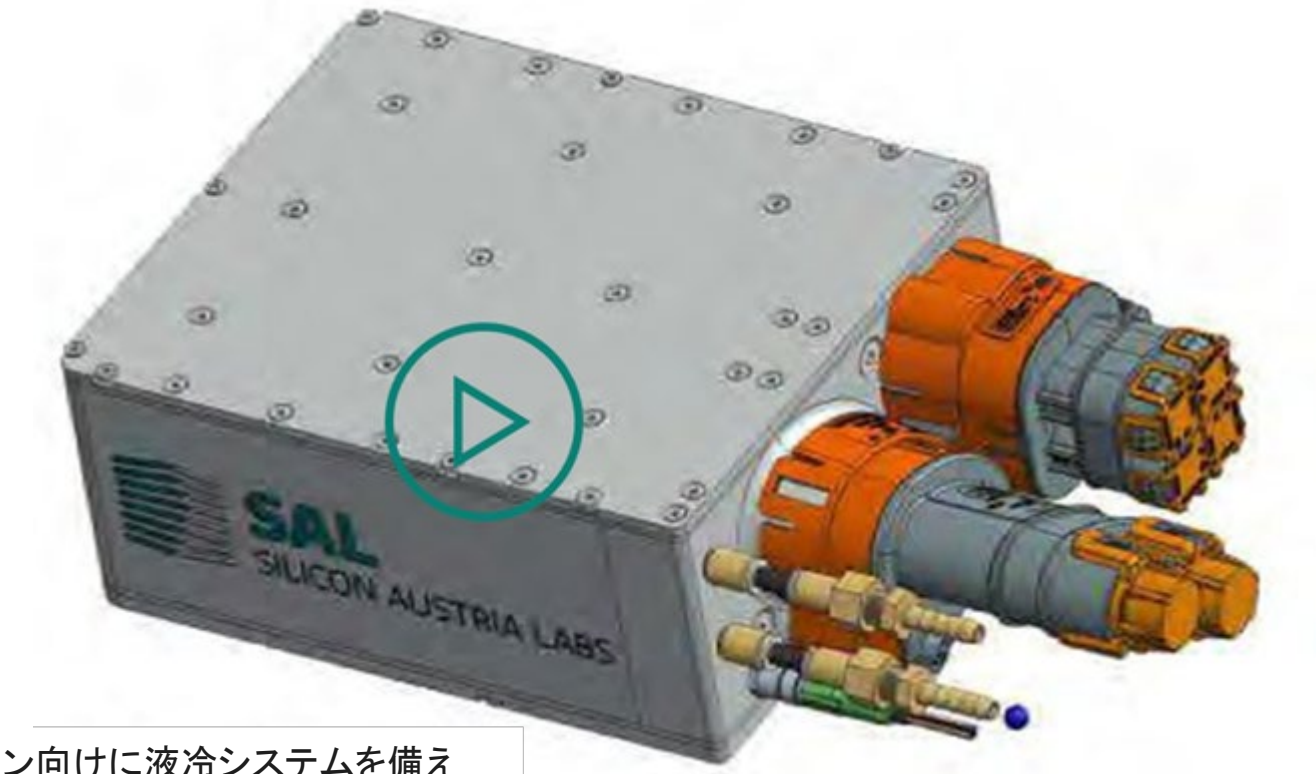


ピン構造



Copyright © Infineon Technologies AG 2024. All rights reserved.

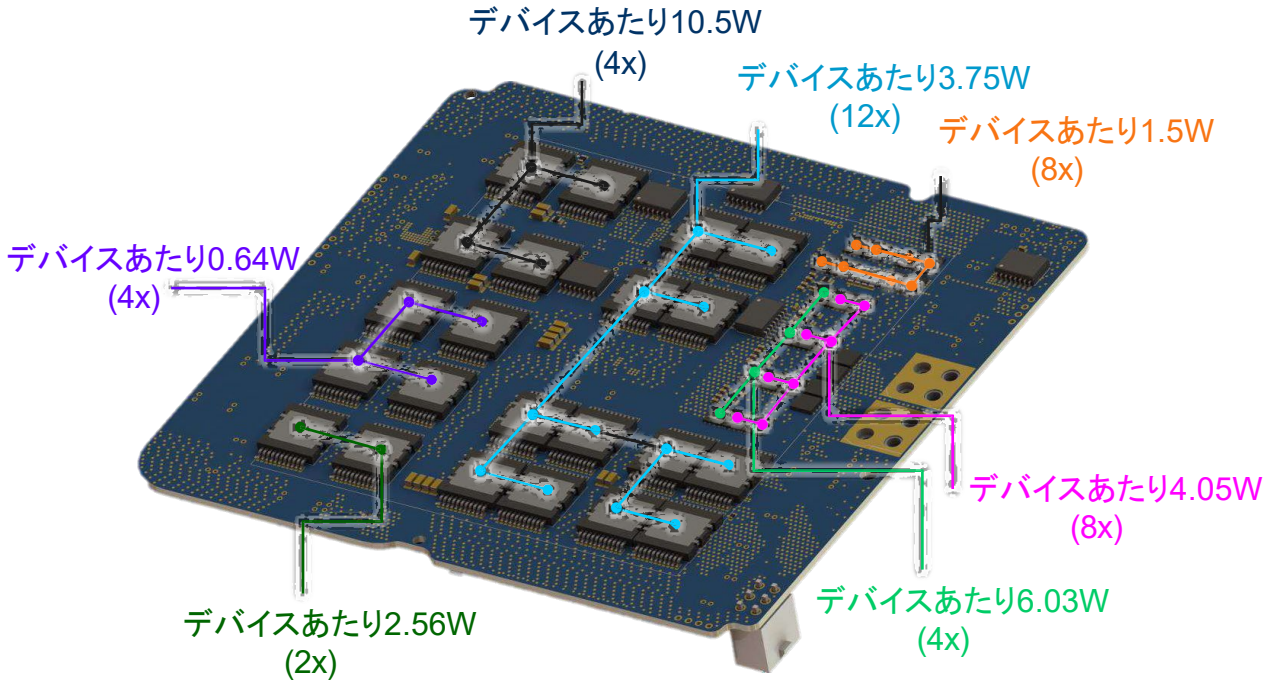
熱／機械シミュレーション
最終アニメーション

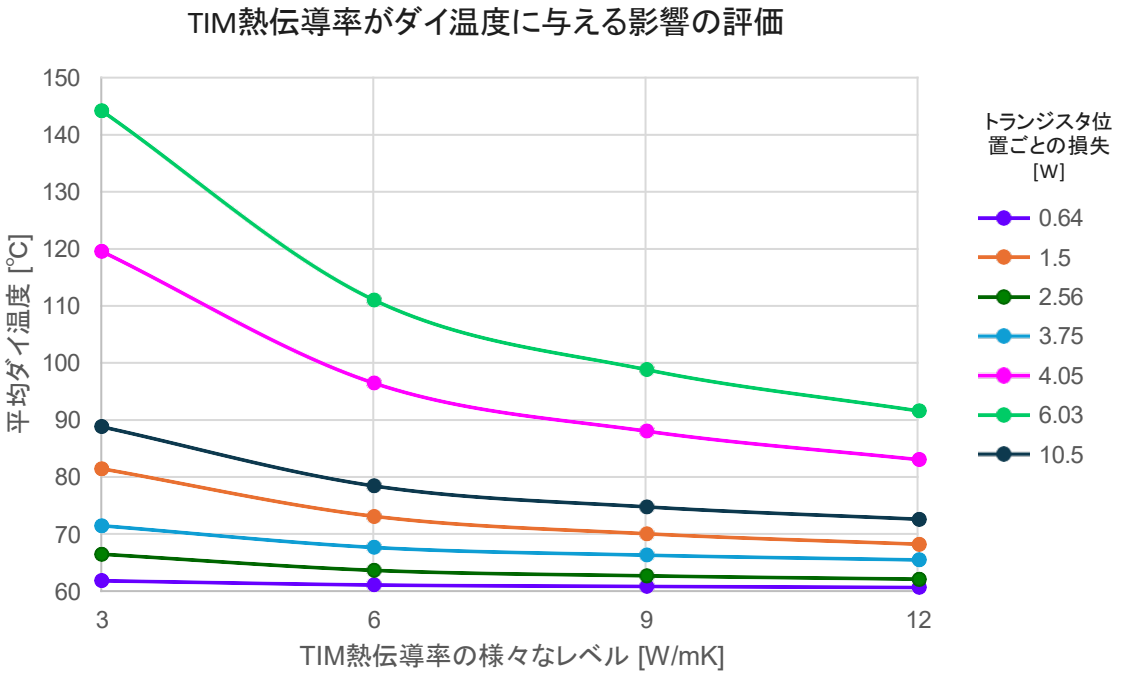


車載用OBC アプリケーション向けに液冷システムを備えたアセンブリコンセプト全体

Copyright © Infineon Technologies AG 2024. All rights reserved.

熱／機械シミュレーション
TIM の熱伝導率が半導体へ与える影響

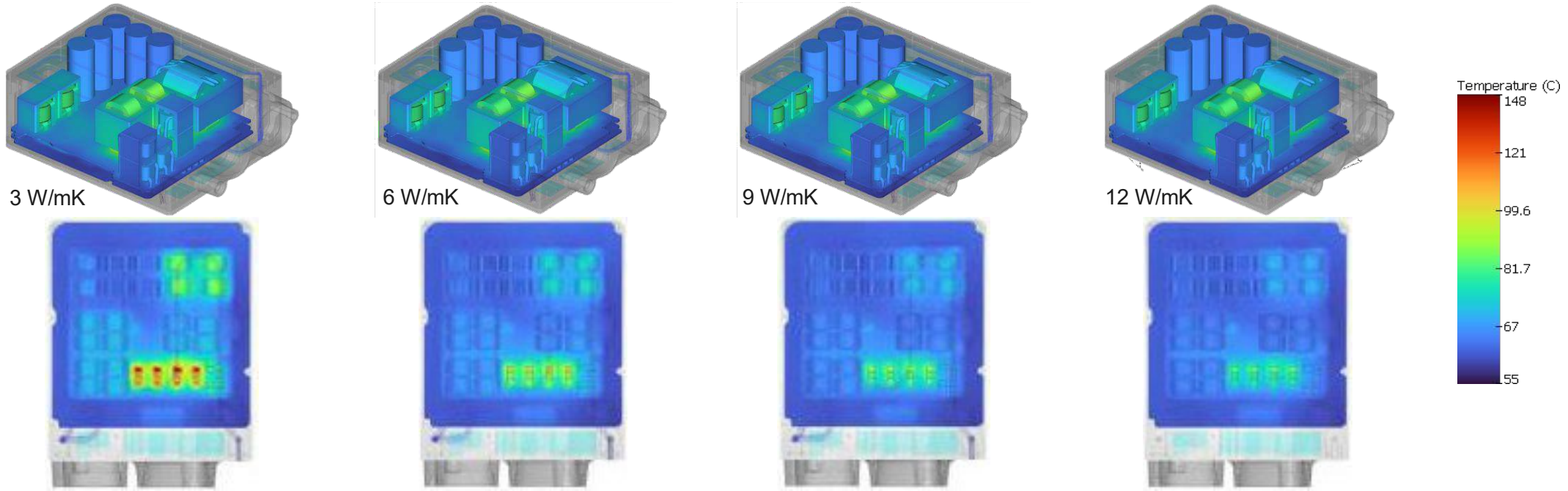




損失 [W]	TIMの熱伝導率 $\lambda K = 3\ W/mK$		TIMの熱伝導率 $\lambda K = 6\ W/mK$		TIMの熱伝導率 $\lambda K = 9\ W/mK$		TIMの熱伝導率 $\lambda K =$ W/mK	
	最大ダイ温度 [°C]	平均ダイ温度 [°C]	最大ダイ温度 [°C]	平均ダイ温度 [°C]	最大ダイ温度 [°C]	平均ダイ温度 [°C]]	最大ダイ温度 [°C]	平均ダイ温度 [°C]
0.64	62.9	62.1	62.1	61.4	61.9	61.1	61.7	61.0
1.5	83.9	81.7	75.6	73.4	72.6	70.3	71.0	68.7
2.56	67.0	66.7	64.2	63.9	63.2	62.9	62.8	62.5
3.75	72.9	71.7	69.1	67.9	67.8	66.6	67.1	65.9
4.05	122.0	119.8	99.2	96.7	90.9	88.3	86.6	83.9
6.03	148.1	144.4	114.2	111.2	101.9	99.0	95.5	92.6
10.5	90.1	89.1	79.8	78.7	76.1	75.0	74.2	73.1

Copyright © Infineon Technologies AG 2024. All rights reserved.

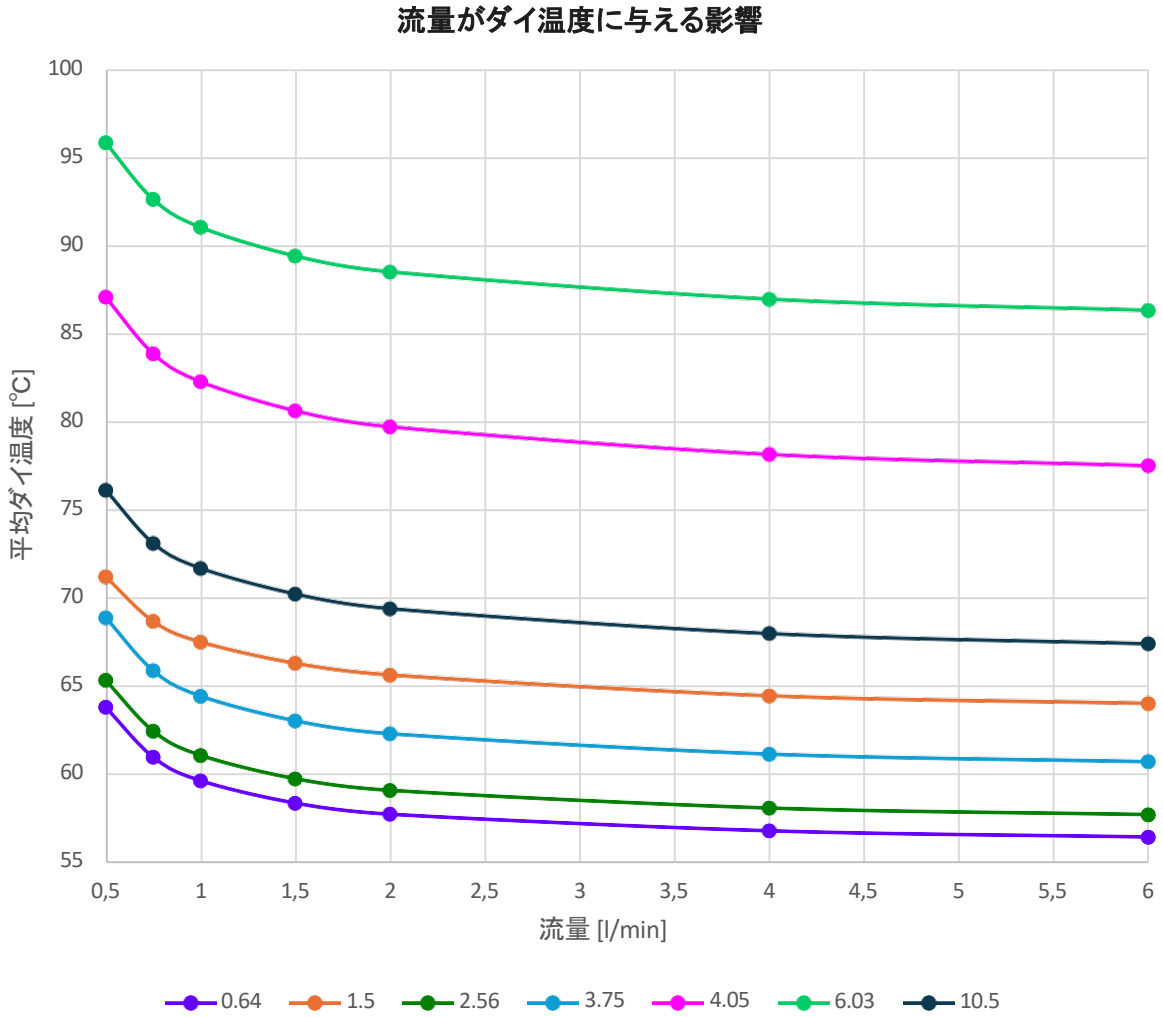
熱／機械シミュレーション
TIMの熱伝導率がシステムに与える影響

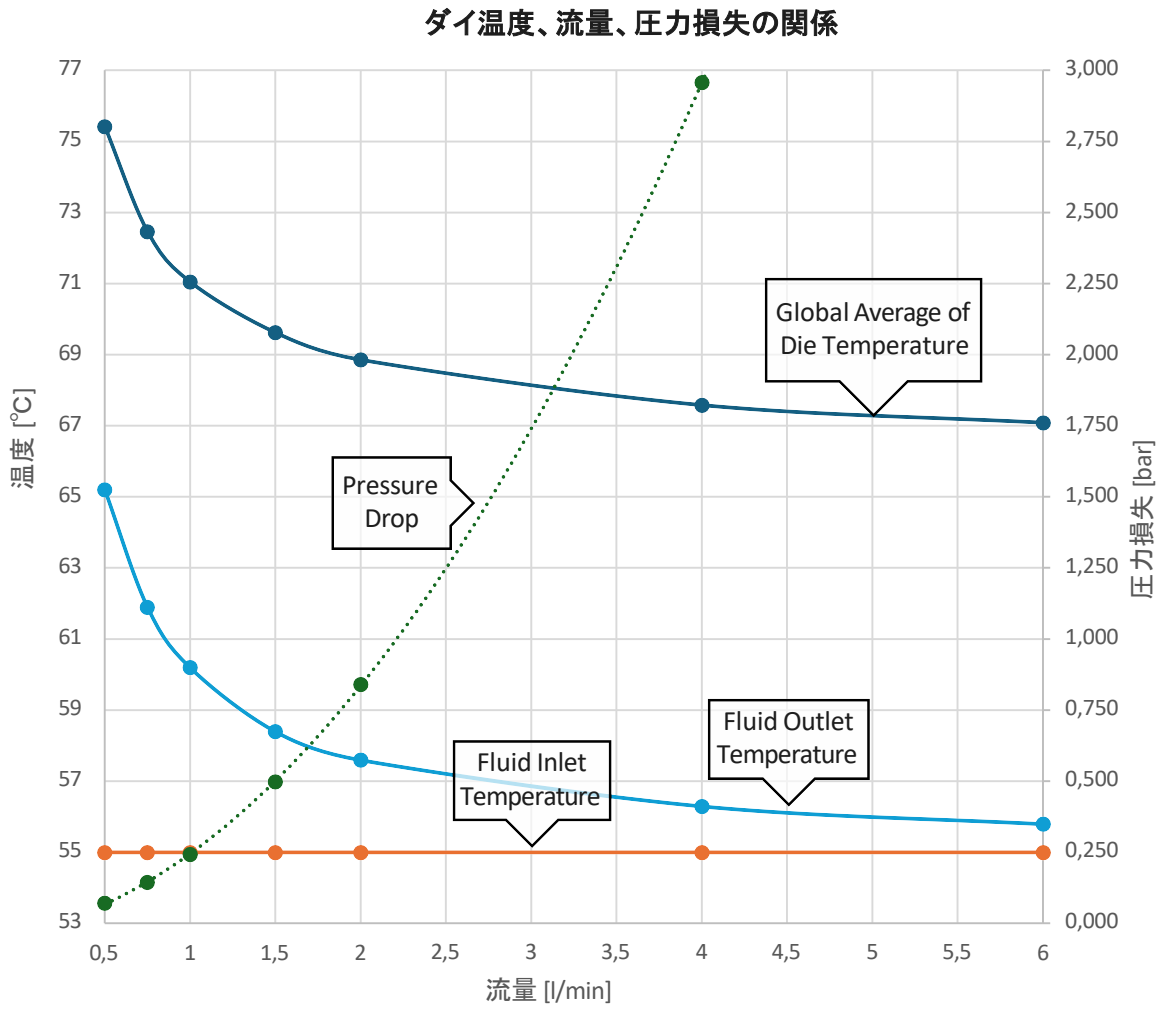


損失 [W]	TIMの熱伝導率 $\lambda K = 3\ W/mK$		TIMの熱伝導率 $\lambda K = 6\ W/mK$		TIMの熱伝導率 $\lambda K = 9\ W/mK$		TIMの熱伝導率 $\lambda K =$ W/mK	
	最大ダイ温度 [°C]	平均ダイ温度 [°C]	最大ダイ温度 [°C]	平均ダイ温度 [°C]	最大ダイ温度 [°C]	平均ダイ温度 [°C]]	最大ダイ温度 [°C]	平均ダイ温度 [°C]
0.64	62.9	62.1	62.1	61.4	61.9	61.1	61.7	61.0
1.5	83.9	81.7	75.6	73.4	72.6	70.3	71.0	68.7
2.56	67.0	66.7	64.2	63.9	63.2	62.9	62.8	62.5
3.75	72.9	71.7	69.1	67.9	67.8	66.6	67.1	65.9
4.05	122.0	119.8	99.2	96.7	90.9	88.3	86.6	83.9
6.03	148.1	144.4	114.2	111.2	101.9	99.0	95.5	92.6
10.5	90.1	89.1	79.8	78.7	76.1	75.0	74.2	73.1

Copyright © Infineon Technologies AG 2024. All rights reserved.

流量、ダイ温度、圧力損失の関係とその重要性





Copyright © Infineon Technologies AG 2024. All rights reserved.

CHARGED
VIRTUAL CONFERENCE
EV ENGINEERING





ismail.recepi@silicon-austria.com
linkedin.com/in/ismail-recepi

rafael.garcia@infineon.com
linkedin.com/in/rafael-garcia-mora-5a1a4658

Copyright © Infineon Technologies AG 2024. All rights reserved.

サポート

資料およびパンフレット	– プロダクトブリーフ – セレクションガイド – アプリケーションパンフレット – プレゼンテーション – プレスリリース、広告
技術資料	– アプリケーションノート – 技術記事 – シミュレーションモデル – データシート, MCDS ファイル – PCB設計データ
評価ボード	– 評価ボード – デモボード – リファレンスデザイン
ビデオ	– 技術ビデオ – 製品情報ビデオ

インフィニオン テクノロジーズ
- www.infineon.com/cms/en/product/promopages/wbg-for-obc
- www.infineon.com/obc

Silicon Austria Labs
- www.silicon-austria-labs.com/en/research/projects/details/tiny-power-box
- www.silicon-austria-labs.com/en/research/projects/details/tiny-power-box-2

Copyright © Infineon Technologies AG 2024. All rights reserved.